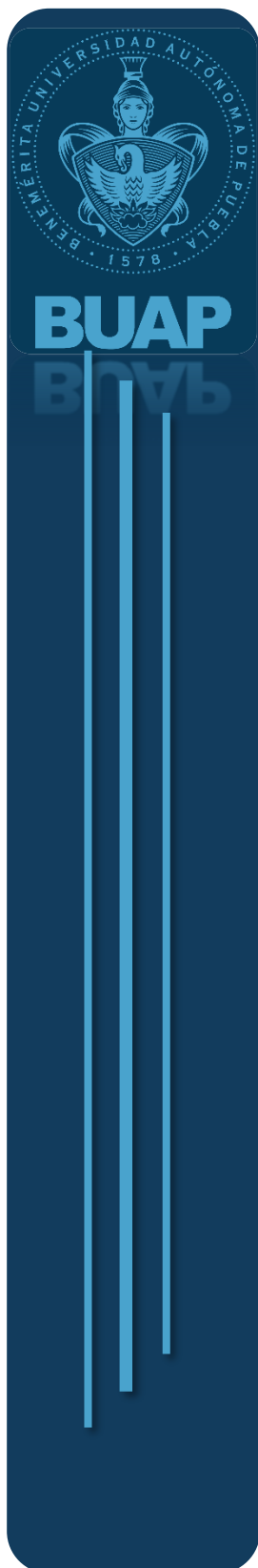


BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE GEOFÍSICA

“Exploración hidrogeológica en las comunidades de San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán del municipio de Acajete, para determinar los sitios más apropiados para el alumbramiento de agua potable”

Tesis presentada como requisito para obtener el título de:
Licenciado en Ingeniería Geofísica

Presenta:
Gloria Isabel Salazar Ramírez

Asesor de Tesis:
Ing. Isaac Raúl Soriano Garibo

Puebla, Pue., junio 2016



BUAP

Oficio No. S.AC. 2172/15
ACEPTACIÓN TEMA TESIS

C. GLORIA ISABEL SALAZAR RAMIREZ
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA GEOFÍSICA
DE LA B.U.A.P.
PRESENTE.

En atención a la autorización del Tema de Tesis que puso Usted a consideración de esta Facultad, se turnó la misma al :

ING. GEOL. ISAAC RAÚL SORIANO GARIBO
COORDINADOR DEL COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA

Habiendo autorizado el tema denominado:

“ EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LAS COMUNIDADES DE SAN JUAN TEPULCO Y SAN JERÓNIMO OCOTILÁN DEL MUNICIPIO DE ACAJETE, PARA DETERMINAR LOS SITIOS MÁS APROPIADOS PARA EL ALUMBRAMIENTO DE AGUA POTABLE”

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno de esta tesis al **ING. GEOLOGO ISAAC RAÚL SORIANO GARIBO**

Sin otro particular de momento, me es grato quedar de usted.

ATENTAMENTE
“PENSAR BIEN PARA VIVIR MEJOR”
H. Puebla de Z., 2 de septiembre de 2015

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRAN ARROYO
DIRECTOR



C.c.p.- Mesa de Exámenes Profesionales
Asesor
Archivo

M'EIVA*M'AEPS*rba.

Facultad
de Ingeniería



Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610



BUAP

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA B.U.A.P.

Presente.

El suscrito : **ING. GEOL. ISAAC RAÚL SORIANO GARIBO**, Asesor Interno del Tema de Tesis denominado:

“EXPLORACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LAS COMUNIDADES DE SAN JUAN TEPULCO Y SAN JERÓNIMO OCOTITLÁN DEL MUNICIPIO DE ACAJETE, PARA DETERMINAR LOS SITIOS MÁS APROPIADOS PARA EL ALUMBRAMIENTO DE AGUA POTABLE”

Presentado por la **C. GLORIA ISABEL SALAZAR RAMIREZ**, Pasante de la Carrera de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. 2172/15, de fecha 2 de septiembre de 2015, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente** el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente **autorizar la impresión** de la misma.

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE
H. Puebla de Z., 20 de junio de 2016

ING. GEOL. ISAAC RAÚL SORIANO GARIBO
ASESOR

C.c.p.- Interesado
Expediente
rba

60
AÑOS DE
AUTONOMÍA
UNIVERSITARIA

Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Agradecimientos

Al Ing. Isaac Raúl Soriano Garibo, al M.C. José Serrano Ortiz y al M.C. José O. F. Aguilar Andrade por ser una columna importante en la culminación de esta etapa académica y por compartir sus conocimientos.

Dedicatoria

A mi madre Isabel Ramírez y a mi padre Omar Salazar, por permitir mi existencia en este mundo, así como todo su amor, apoyo y sacrificios que me han dado para que mi formación personal y académica fuese cada día mejor.

A mi hermana Susy por su compañía, cariño.

A mi novio Felix, por apoyarme en todas mis decisiones, su comprensión y amor incondicional que me ha brindado en todo momento.

Gracias, a todos ustedes.

Resumen

Se realizaron dos estudios geoelectricos en la modalidad de sondeos electricos verticales con el arreglo Schlumberger; distribuidos en las comunidades de San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán, ambas pertenecientes al municipio de Acajete, con un total de nueve sondeos.

El procesamiento de los datos de resistividades se realizó a través del software IPI2Win. Posteriormente se construyeron diez perfiles con la finalidad de visualizar mejor la distribución de las resistividades, espesores y profundidades de las capas propuestas para cada sondeo. Por medio de la interpretación de las secciones tanto geoelectricas como de la geología local y regional, permitieron conocer las diferentes unidades litológicas que conforman a las comunidades antes mencionadas.

A partir del análisis de las secciones geoelectricas y geológicas de cada unidad litológica presente por debajo de cada de los nueve sondeos, así como su capacidad de permeabilidad se determinó que el sondeo SEV-5T ubicado en San Juan Tepulco presenta las mejores condiciones para el alumbramiento de agua subterránea a una profundidad de 250 m, en tanto que el SEV-4J ubicado en San Jerónimo Ocotitlán se propone a una profundidad de exploración de 150 m.

Contenido

Agradecimientos	I
Dedicatoria	II
Resumen	III
Contenido	IV
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	XI
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	I
1 Introducción	2
1.1 Introducción	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 General	4
1.4.2 Específicos	5
CAPÍTULO 2 ÁREA DE ESTUDIO	6
2 Área de estudio	7
2.1 Localización y acceso	7
2.2 Fisiografía	8
2.2.1 Fisiografía regional	8
2.2.2 Fisiografía local	10
2.3 Geología	11
2.3.1 Geología regional	11
2.3.2 Geología local	14
2.3.2.1 Historia eruptiva de La Malinche	17
2.4 Estratigrafía	19
Formación Orizaba	20
Formación Maltrata	20

Unidad eruptiva La Malinche	21
2.5 Geología estructural	22
2.6 Clima	23
2.7 Hidrología	24
2.8 Hidrogeología	27
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO	28
3 Marco teórico	29
3.1 Prospección geoelectrica	29
3.2 Métodos de resistividad	30
3.2.1 Resistividad	30
3.2.2 Resistividad aparente	32
3.2.2.1 Arreglo Schlumberger	34
3.2.3 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)	35
3.2.4 Curvas de resistividades	38
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	40
Metodología	41
4.1 Trabajo en campo	41
4.1.1 Planificación	41
4.1.2 Adquisición de datos	41
4.1.3 Equipo utilizado	45
4.2 Trabajo en gabinete	47
CAPÍTULO 5 RESULTADOS	49
5 Resultados	50
5.1 Procesamiento	50
5.2 Perfiles	51
5.3 Cortes geoelectricos	54
5.3.1 Cortes geoelectricos de San Juan Tepulco	54
Sección del Perfil I-I'T	54
Sección del Perfil II-II'T	56
Sección del Perfil III-III'T	58

Sección del Perfil IV-IV'T	60
Sección del V-V'T	61
Sección del Perfil VI-VI'T	62
5.3.2 Cortes geoelectrías de San Jerónimo Ocotitlán	64
Sección del Perfil I-I'J	64
Sección del Perfil II-II'J	66
Sección del Perfil III-III'J	67
Sección del Perfil IV-IV'J	68
5.4 Unidades geoelectrías	69
5.4.1 Unidades geoelectrías de San Juan Tepulco	70
Unidades geoelectrías del Perfil I-I'T	71
Unidades geoelectrías del Perfil II-II'T	72
Unidades geoelectrías del Perfil III-III'T	73
Unidades geoelectrías del Perfil IV-IV'T	74
Unidades geoelectrías del Perfil V-V'T	75
Unidades geoelectrías del Perfil VI-VI'T	76
5.4.2 Unidades geoelectrías de San Jerónimo Ocotitlán	77
Unidades geoelectrías del Perfil I-I'J	77
Unidades geoelectrías del Perfil II-II'J	78
Unidades geoelectrías del Perfil III-III'J	79
Unidades geoelectrías del Perfil IV-IV'J	80
5.4.3 Correlación de las unidades geoelectrías entre ambas comunidades	81
5.5 Interpretación geológica	83
5.5.1 Perfiles geológicos de San Juan Tepulco	85
Unidades geológicas del Perfil I-I'T	85
Unidades geológicas del Perfil II-II'T	86
Unidades geológicas del Perfil III-III'T	87
Unidades geológicas del Perfil IV-IV'T	89
Unidades geológicas del Perfil V-V'T	90
Unidades geológicas del Perfil VI-VI'T	91
5.5.2 Perfiles geológicos de San Jerónimo Ocotitlán	93
Unidades geológicas del Perfil I-I'J	93
Unidades geológicas del Perfil II-II'J	94

Unidades geológicas del Perfil III-III'J	95
Unidades geológicas del Perfil IV-IV'J	96
5.5.3 Correlación de las unidades geológicas entre ambas comunidades	97
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
6 Conclusiones y recomendaciones	102
6.1 Conclusiones	102
6.2 Recomendaciones	107
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	113
Memoria fotográfica	114
Ubicación de los sondeos en San Juan Tepulco	114
Ubicación de los sondeos en San Jerónimo Ocotitlán	119

Índice de Figuras

Figura 2.1. Localización del municipio de Acajete del estado de Puebla.	7
Figura 2.2. Acceso al municipio de Acajete desde la ciudad de Puebla.	8
Figura 2.3. Provincias y Subprovincias en el estado de Puebla. Las comunidades de San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán se encuentran en la Provincia del Eje Neovolcánico y a su vez en la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac.	9
Figura 2.4. Sistema de toposformas que constituyen a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac en el territorio del municipio de Acajete.	10
Figura 2.5. Entorno tectónico y principales centros volcánicos del Eje Neovolcánico. Los triángulos indican los principales estratovolcanes: CO, Volcán de Colima; NT, Nevado de Toluca; IZ, Iztaccíhuatl; PO, Popocatepetl; LM, La Malinche; CP, Cofre de Perote; Por, Pico de Orizaba. Los círculos indican las calderas: LP, La Primavera; Al; Los Azufres; LH, Los Humeros. Ferrari, L., 2000.	12
Figura 2.6. Mapa geológico de la zona de estudio.	16
Figura 2.7. Sección estratigráfica de los depósitos volcánicos más representativos de La Malinche. Castro-Govea y Siebe (2007).	18
Figura 2.8. Ubicación de La Malinche en la parte baja del Graben de Puebla como resultado del sistema de fallas Tlaxcala, Zacatelco, Huejotzingo y Tepeaca. Los números 1, 2 y 3 indican la ubicación de los volcanes La Malinche, Popocatepetl e Iztaccíhuatl respectivamente. (Lermo-Samaniego y Bernal-Esquia, 2006).	22
Figura 2.9. Climas presentes en el municipio de Acajete.	24
Figura 2.10. Corrientes de agua de tipo intermitente que presenta el municipio de Acajete, principalmente durante el período de lluvias.	26
Figura 3.1. Forma generalizada de la configuración electródica utilizada en la medición de la resistividad en el subsuelo (Kearey, et al., 2002).	30
Figura 3.2. Sí se considera un cubo eléctricamente uniforme de longitud L por lado a través del cual una corriente eléctrica (I) está pasando. El material dentro del cubo resiste la conducción de la electricidad a través de él, resultando en un decaimiento del potencial (V) entre las caras opuestas (Reynolds, J., 1998).	31
Figura 3.3. Separación entre los electros de corriente y voltaje AM, BM, AN y BN, utilizadas para el cálculo de la resistividad aparente.	33
Figura 3.4. Configuración electródica Schlumberger.	35
Figura 3.5. Mediciones de la resistividad aparente aumentando el espaciamiento entre los electrodos de corriente (AB) para incrementar la profundidad de penetración de la corriente inyectada; siendo $c > b > a$, tanto en el espaciamiento entre los electrodos AB como en profundidad. Los resultados son registrados en una curva de resistividades (Kirsch, et al., 2009).	36

Figura 3.6. Curva de resistividades aparentes, obtenida a partir de un sondeo eléctrico vertical en el que se incrementó el espaciamiento entre los electrodos de potencial (Milsom, J., 2003).	37
Figura 3.7. Curvas de resistividad aparente para diferentes estructuras de la resistividad: (A) a (D) son modelos de tres capas; (E) y (F) son modelos de cuatro capas.	39
Figura 4.1. Ubicación de los sondeos llevados a cabo en la comunidad de San Juan Tepulco, los cuales están comprendidos en dicha comunidad, así como también en la cabecera municipal de Acajete.	43
Figura 4.2. Ubicación de los sondeos llevados a cabo en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, los cuales están comprendidos en dicha comunidad.	44
Figura 4.3. Equipo SCINTREX utilizado en la adquisición de los datos de resistividad aparente. De izquierda a derecha de la imagen se tiene el transmisor, el receptor y el motogenerador; así como los electrodos empleados.	46
Figura 5.1. Modelo con mejor ajuste entre la curva teórica y la de campo para el sondeo SEV-3J.	50
Figura 5.2. Distribución de los seis perfiles propuestos en San Juan Tepulco.	52
Figura 5.3. Distribución de los cuatro perfiles propuestos en San Jerónimo Ocotitlán.	53
Figura 5.4. Sección geoelectrica del Perfil I-I'.	55
Figura 5.5. Sección geoelectrica del Perfil II-II'T.	57
Figura 5.6. Sección geoelectrica del Perfil III-III'T.	59
Figura 5.7. Sección geoelectrica del perfil IV-IV'T.	60
Figura 5.8. Sección geoelectrica del Perfil V-V'T.	62
Figura 5.9. Sección geoelectrica del Perfil VI-VI'T.	63
Figura 5.10. Sección geoelectrica del Perfil I-I'J.	65
Figura 5.11. Sección geoelectrica del Perfil II-II'J.	66
Figura 5.12. Sección geoelectrica del Perfil III-III'J.	67
Figura 5.13. Sección geoelectrica del Perfil IV-IV'J.	69
Figura 5.14. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil I-I'T.	71
Figura 5.15. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil II-II'T.	72
Figura 5.16. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil III-III'T.	73
Figura 5.17. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil IV-IV'T.	74
Figura 5.18. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil V-V'T.	75
Figura 5.19. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil VI-VI'T.	76
Figura 5.20. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil I-I'J.	77

Figura 5.21. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil II-II'J.	78
Figura 5.22. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil III-III'J.	79
Figura 5.23. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil IV-IV'J.	80
Figura 5.24. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil A-A'.	82
Figura 5.25. Unidades geológicas presentes en el Perfil I-I'T.	85
Figura 5.26. Unidades geológicas presentes en el Perfil II-II'T.	87
Figura 5.27. Unidades geológicas presentes en el Perfil III-III'T.	88
Figura 5.28. Unidades geológicas presentes en el Perfil IV-IV'T.	89
Figura 5.29. Unidades geológicas presentes en el Perfil V-V'T.	91
Figura 5.30. Unidades geológicas presentes en el Perfil VI-VI'T.	92
Figura 5.31. Unidades geológicas presentes en el Perfil I-I'J.	93
Figura 5.32. Unidades geológicas presentes en el Perfil II-II'J.	94
Figura 5.33. Unidades geológicas presentes en el Perfil III-III'J.	96
Figura 5.34. Unidades geológicas presentes en el Perfil IV-IV'J.	97
Figura 5.35. Unidades geológicas presentes en el Perfil A-A'.	99
Figura 6.1. Zona saturada de agua delimitada por la línea punteada en la comunidad de San Juan Tepulco, así como la profundidad propuesta a la que debería realizarse el pozo profundo en esta comunidad.	106
Figura 6.2. Zona saturada de agua delimitada por la línea punteada en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, así como la profundidad propuesta a la que debería realizarse el pozo profundo en esta comunidad.	107

Índice de Tablas

Tabla 2.1. División de las aguas superficiales presentes en el municipio de Acajete. CONAGUA, 2013.	25
Tabla 3.1. Clasificación de los métodos geoelectricos de acuerdo a la fuente generadora y al tipo de corriente.	29
Tabla 4.1. Ubicación geográfica de los SEVs llevados a cabo en San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán, Acajete.	42
Tabla 4.2. Equipo, accesorios y herramientas complementarios empleados en el trabajo en campo.	47
Tabla 5.1. Nomenclatura de los perfiles realizados en ambas campañas.	51
Tabla 5.2. Relación de las unidades geoelectricas con los valores de resistividades.	70
Tabla 5.3. Asociación de las unidades geoelectricas con la geología correspondiente a las zonas de interés.	84

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

1.1 Introducción

Durante las primeras etapas de la sociedad los ríos constituyeron la principal fuente de abastecimiento para uso agrícola, mientras que los manantiales lo eran fundamentalmente para uso doméstico y consumo humano. Al paso de los años, el incremento de la población y sus actividades, la disminución de los caudales, la contaminación del agua y de manera especial, los avances tecnológicos que posibilitaron su extracción y conducción masiva, conllevaron a que el agua subterránea se convirtiera en la principal fuente de abastecimiento, y en muchas poblaciones la única (García, H. E. & Loreto, L. R., 2009). El consumo del agua subterránea se ha incrementado en los últimos años principalmente en los sectores de abastecimiento público e industrial; para lograr satisfacer esta demanda se construyen pozos profundos en aquellos puntos que presentan un potencial de contener agua subterránea y así poderla extraer.

En los últimos años la geofísica ha ido ganando terreno en diversas áreas de la exploración, debido al costo relativamente menor en comparación con los métodos directos de exploración como lo es la perforación. En la búsqueda de aguas subterráneas el método comúnmente utilizado a nivel global es el método de resistividad a través de sondeos eléctricos verticales, debido a los buenos resultados que se obtienen, cuando desde la adquisición de los datos hasta la interpretación geológica son realizados de una manera correcta.

La realización de los sondeos eléctricos verticales (SEVs) en las comunidades de San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán, ambas pertenecientes al municipio de Acajete, Puebla, surge en relación a las demandas de los pobladores de dichas comunidades para ser abastecidos con el recurso hídrico de una manera suficiente y de calidad ante la poca disponibilidad de agua potable actual. El incremento desproporcionado de la población, la disminución de las zonas de recarga, la variación de las condiciones climatológicas en las últimas décadas, han conllevado de forma conjunta que en los últimos años el Sistema La Floresta Malinche y el Pozo del Parque sean deficientes

para abastecer de este recurso a los pobladores. Por ello, la necesidad de señalar los puntos más propicios para la extracción de agua potable mediante la construcción de pozos profundos tanto en la comunidad de San Juan Tepulco como en la de San Jerónimo Ocotitlán.

Además, hoy en día la perforación de un pozo profundo debe ser autorizada por CONAGUA, instancia que solicita para otorgar el permiso de perforación un estudio geofísico. Razón por la que las autoridades municipales de Acajete recurrieron a la contratación de los servicios profesionales del Ing. Isaac Garibo para dar solución a esta problemática, quien a su vez me brindó los datos necesarios para el desarrollo de este trabajo de tesis.

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad la disponibilidad del recurso hídrico en el municipio de Acajete es baja; debido principalmente al incremento de la población y en consecuencia sus actividades que cada día demandan una mayor cantidad de agua, siendo insuficiente el sistema que provee del recurso hídrico al municipio. Por ello, es imprescindible que se tomen medidas para revertir dicha situación y evitar problemas por falta de agua, siendo una de ellas la exploración geoeléctrica; a partir de la cual se establecen nuevos puntos de suministro que presenten la posibilidad de proporcionar el caudal suficiente para el abastecimiento del agua en la zona de estudio.

En base a los antecedentes de estudios geoeléctricos previos se sabe que esta región presenta condiciones geohidrológicas difíciles para obtener el recurso hídrico; no obstante, vale la pena llevar a cabo la exploración a profundidades mayores de 200 m y evaluar sus posibilidades de alumbramiento de agua, para así cubrir la demanda de agua tanto a la población de San Juan Tepulco como a la de San Jerónimo Ocotitlán.

1.3 Justificación

El sistema de agua potable que abastece al municipio de Acajete es denominado La Floresta Malinche; el cual se encuentra ubicado en el municipio de Nopalucan, a su vez este sistema provee del recurso hídrico a los municipios de Tepatlaxco de Hidalgo y Amozoc, todos ellos pertenecientes al estado de Puebla. Dicho sistema tiene más de 20 años dando servicio a dichos municipios, en el que a Acajete le corresponden 50 lps, a Tepatlaxco 35 lps y a Amozoc 25 lps, obteniendo un caudal total de 110 lps, el cual proviene de tres pozos denominados Floresta I, II y III. Los municipios enunciados anteriormente cuentan con una población de 60353, 16275 y 100964 habitantes respectivamente (SIMBAD INEGI, 2010). Sin embargo, en los últimos años se ha observado una disminución en el caudal del sistema, que conjuntamente con el incremento de la población resulta ser insuficiente para satisfacer las necesidades básicas de los pobladores (uso doméstico, actividades agrícolas e industriales) ocasionado conflictos sociales y políticos entre los municipios. Debido a lo anterior, tanto San Juan Tepulco como San Jerónimo Ocotitlán, gestionaron la realización de un estudio geoeléctrico para conocer los sitios que presenten las mejores características de contener agua subterránea y a partir de ello realizar pozos profundos y de esta forma abastecer de agua a dichas comunidades.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Ubicar los sitios que presenten las condiciones geoeléctricas, geológicas e hidrogeológicas más favorables para el alumbramiento de agua subterránea en las comunidades de San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán, ambas pertenecientes al municipio de Acajete.

1.4.2 Específicos

- Realizar sondeos eléctricos verticales distribuidos en las localidades anunciadas para conocer la estructura geohidrológica del subsuelo, mediante la interpretación geológica y geoeléctrica de las unidades litológicas capaces de almacenar agua subterránea.
- Conocer si existe correlación entre la litología presente en las comunidades de San Juan Tepulco y de San Jerónimo Ocotitlán, a partir de la interpretación geológica dada.

Capítulo 2

ÁREA DE ESTUDIO

2 Área de estudio

2.1 Localización y acceso

El municipio de Acajete se localiza en la parte central del estado de Puebla, así como al noreste con respecto a la ciudad de Puebla que es la capital del estado, aproximadamente a 30 kilómetros de distancia de esta (Figura 2.1). Sus coordenadas geográficas son: 19°00'30" y 19°11'06" de latitud norte y 97°53'54" y 98°00'00" de longitud oeste, presenta un rango de altitudes que va de 2 280 hasta 3 200 m.s.n.m. (INEGI, 2009), esta variación se debe fundamentalmente a que el municipio se encuentra contiguo a la estructura volcánica de La Malinche.

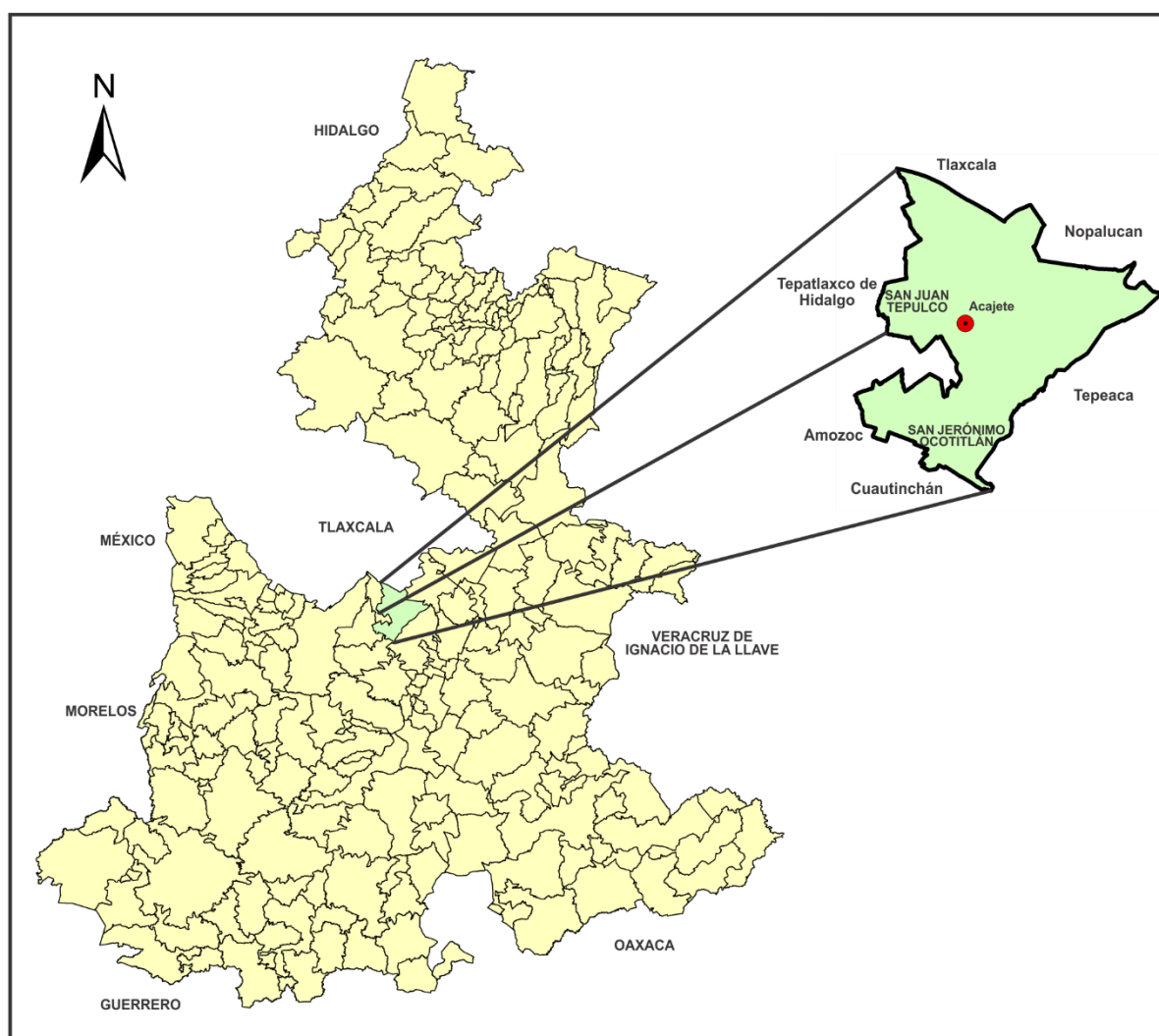


Figura 2.1. Localización del municipio de Acajete del estado de Puebla.

Este municipio posee una extensión territorial de 176.793 km²; se encuentra limitado al norte por el municipio de Tepatlaxco de Hidalgo, el estado de Tlaxcala y el municipio de Nopalucan; al este con los municipios de Nopalucan y Tepeaca; al sur con los municipios de Tepeaca, Cuautinchán y Amozoc; al oeste con los municipios de Amozoc y Tepatlaxco de Hidalgo (Figura 2.1).

El acceso principal a partir de la ciudad de Puebla al municipio de Acajete es por medio de la carretera Federal N.150 Puebla-Tehuacán o por la autopista Puebla-Orizaba, en ambos casos se debe tomar la carretera Federal N.129 Amozoc de Mota-Acajete para llegar a la Presidencia Municipal de Acajete (Figura 2.2).

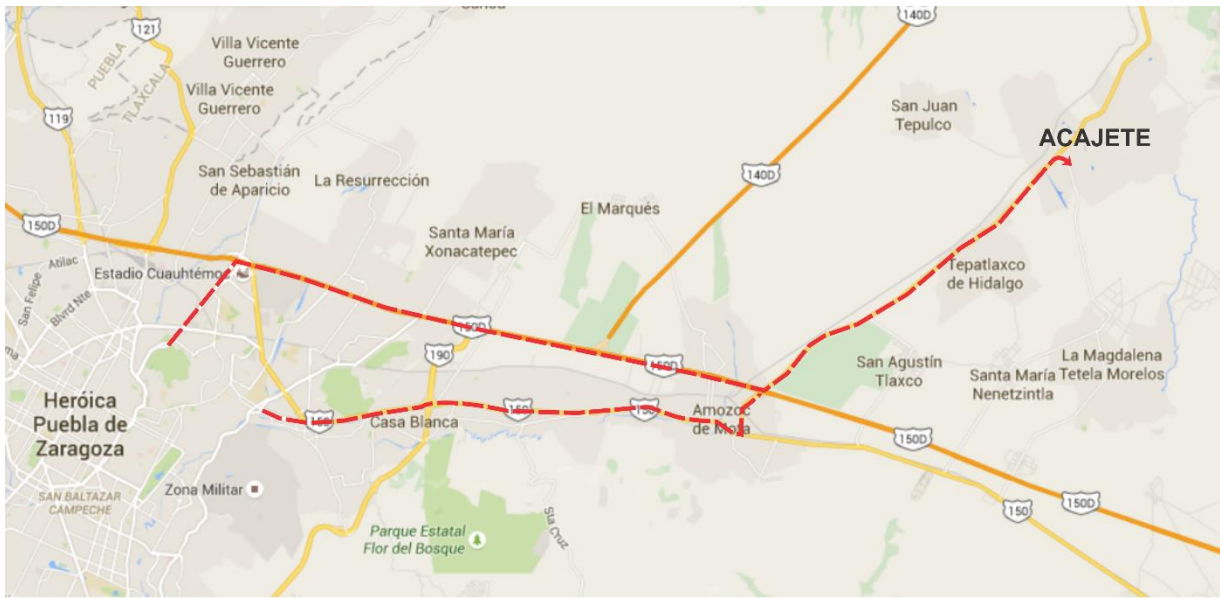


Figura 2.2. Acceso al municipio de Acajete desde la ciudad de Puebla.

2.2 Fisiografía

2.2.1 Fisiografía regional

La República Mexicana ha sido dividida en 15 diferentes provincias fisiográficas (INEGI, 1981; H. Quiñones, 1987), de las cuales el estado de Puebla de acuerdo al Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2013) está comprendido dentro de cuatro provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico cubriendo la parte central, sur y norte del estado con una extensión del 50% del territorio estatal; la Sierra Madre del Sur en la

parte meridional y sureste del estado con una extensión del 35%; la Sierra Madre Oriental en la parte norte con una superficie del 10% y la Llanura Costera del Golfo Norte encontrándose en la parte noreste y cubriendo el 5% de la superficie estatal (Figura 2.3). A su vez el estado se encuentra constituido por nueve subprovincias fisiográficas que muestran características distintivas en cuanto a geología, altitud, hidrología, clima, precipitación pluvial, suelos y vegetación (INEGI, 2014).

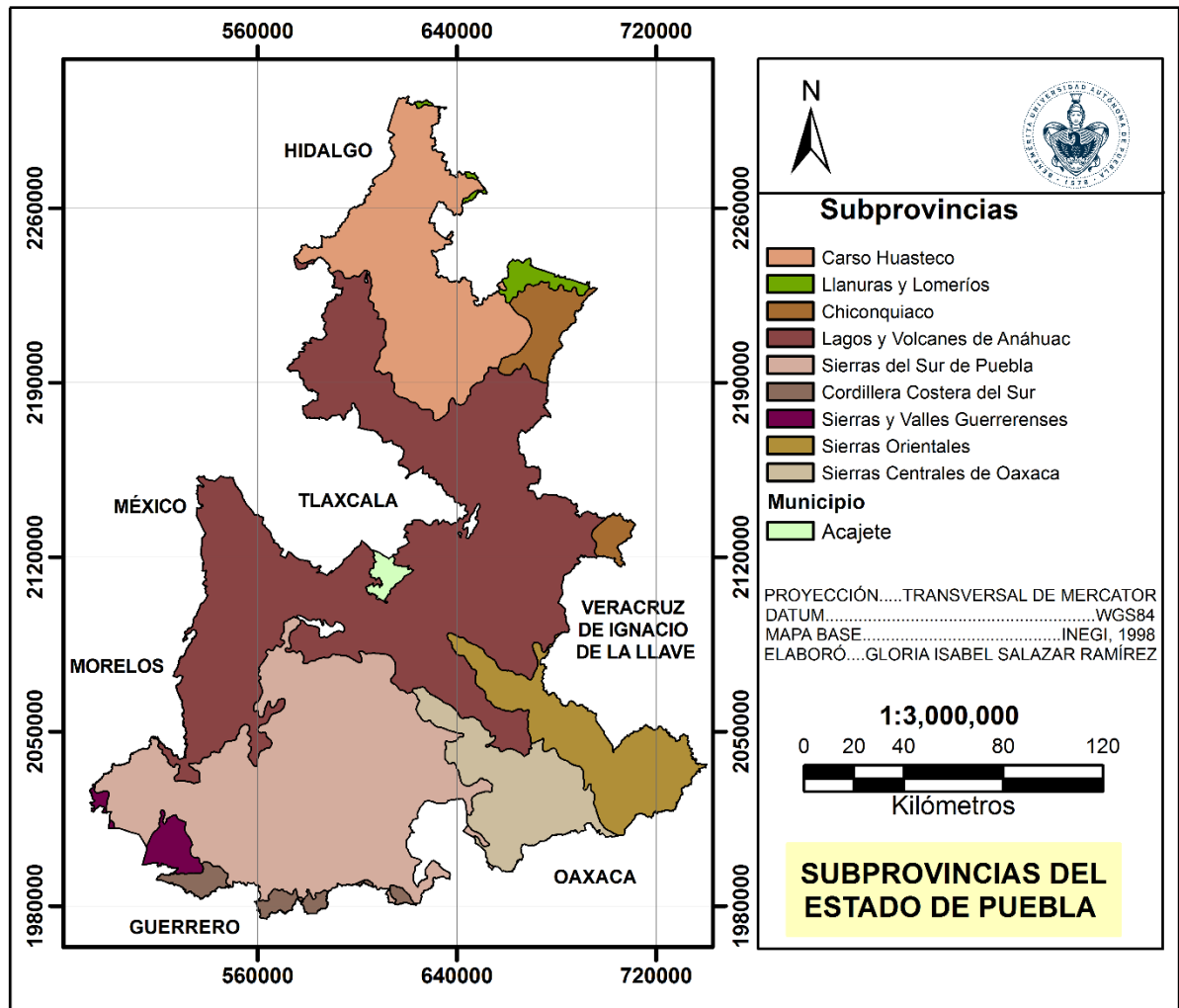


Figura 2.3. Provincias y Subprovincias en el estado de Puebla. Las comunidades de San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán se encuentran en la Provincia del Eje Neovolcánico y a su vez en la Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac.

2.2.2 Fisiografía local

El municipio de Acajete queda comprendido en su totalidad en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico (Figura 2.3) que a su vez pertenece completamente a una de las 15 subprovincias en que se halla dividido el Eje Neovolcánico, la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, caracterizada por contener grandes sierras volcánicas y volcanes individuales. El territorio de Acajete se encuentra distribuido sobre cuatro sistemas de topoformas: Llanura aluvial con lomerío con un 39.4% de la extensión superficial del municipio; Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados cubriendo un 36.8% de la superficie; Meseta basáltica escalonada con el 23.7% y Sierra volcánica de laderas tendidas abarcando tan sólo el 0.1% (INEGI, 2009).

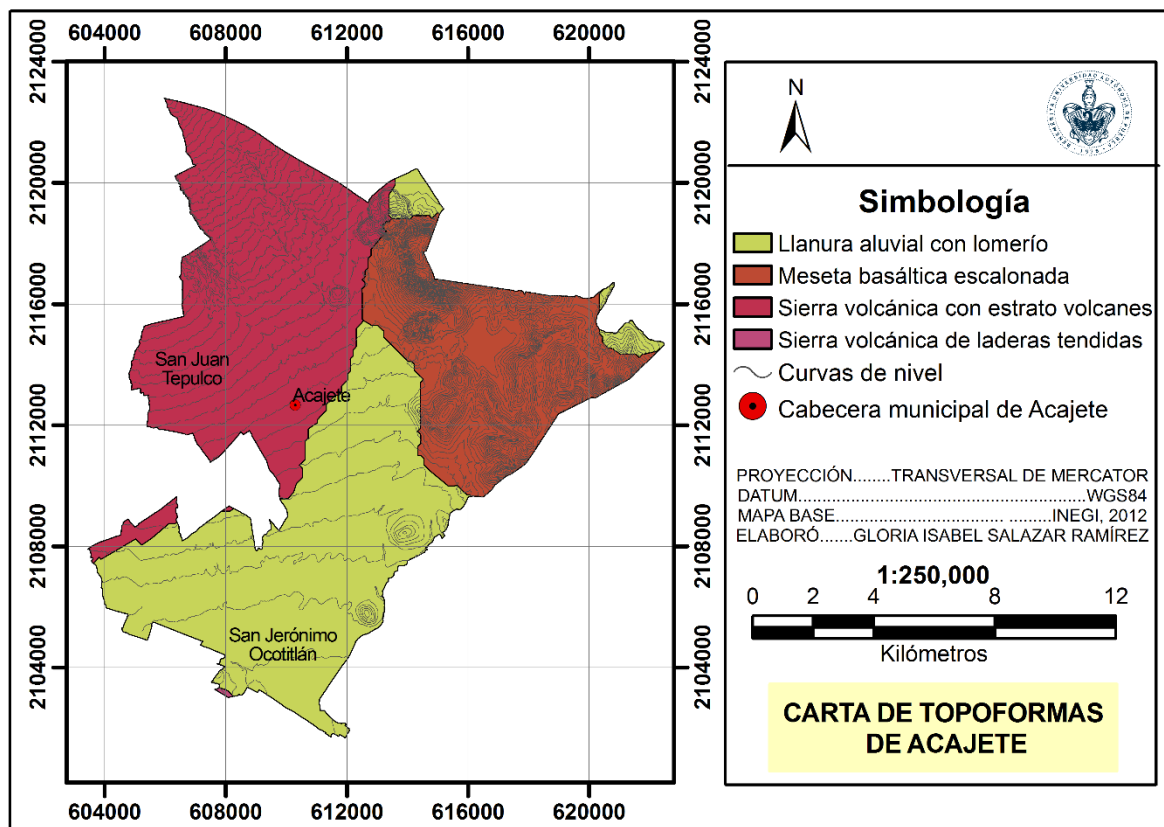


Figura 2.4. Sistema de topoformas que constituyen a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac en el territorio del municipio de Acajete.

En la Figura 2.4 se aprecia que la comunidad de San Juan Tepulco forma parte del sistema de topofomas de Sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados, debido a que se encuentra situado en la porción inferior de la ladera sureste de La Malinche, el cual se considera como un estrato volcán aislado. Por otra parte, la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán está comprendida en el sistema de topofomas de Llanura aluvial con lomerío, cuyo origen se debe principalmente a la depositación de material clástico de diferentes granulometrías (boleos, arenas gruesas y finas, algunos limos y escasas arcillas), el cual ha sido arrastrado por las aguas de escorrentía provenientes de las laderas del volcán La Malinche así como de los cerros circundantes al municipio de Acajete tanto de origen ígneo como El Pinal, El Tintero, Huilotepec, Temazcalito y también de origen sedimentario como el Cerro Amozoc, Cerros Santa Rosa, Cerros Encinos Grandes y Cerro San Martín por mencionar algunos.

2.3 Geología

2.3.1 Geología regional

El Eje Neovolcánico es una gran estructura del relieve conocida también como cinturón, faja, altiplanicie, meseta, sistema, cordillera y sierra, presentando las siguientes características de acuerdo a Lugo-Hubp (1990):

1. Su origen. Entre las diversas teorías expuestas, la más aceptada actualmente es la de la subducción de la Placa de Cocos bajo el continente (Figura 2.5), con diversos ángulos, lo que explicaría la no coincidencia entre la orientación de la Trinchera Mesoamericana y el Sistema Neovolcánico así como también que a nivel de la astenosfera sufra una fusión parcial y origine los magmas del eje (Demant, 1978; Urrutia y del Castillo, 1977; Mooser, 1975).
2. Su dinámica de desarrollo en el Cuaternario y en especial en el Pleistoceno tardío-Holoceno, época en que la actividad endógena se manifiesta en grandes superficies con predominio sobre los procesos exógenos niveladores. Asimismo, el volcanismo joven se presenta con mayor intensidad en zonas bien definidas del mismo (Demant, A., 1978).

- La diversidad de procesos exógenos antiguos y actuales. En toda la extensión de esta gran provincia existen lagos actuales y huellas (sedimentos) de antiguos valles fluviales, glaciares y formas correspondientes del Pleistoceno tardío y Holoceno; y desarrollo de barrancos, prácticamente todos los tipos de procesos de laderas y procesos periglaciales, todo ello condicionado por la actividad volcánica joven.

El relieve del Eje Neovolcánico consiste en una serie de planicies escalonadas que se extienden desde cerca de las costas de Colima y Nayarit hasta la región de los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote en el estado de Veracruz, aunque geológicamente se extiende hasta las costas del Golfo de México, como proponen varios autores (Lugo-Hubp, 1990; Demant, A., 1979; Figura 2.5).

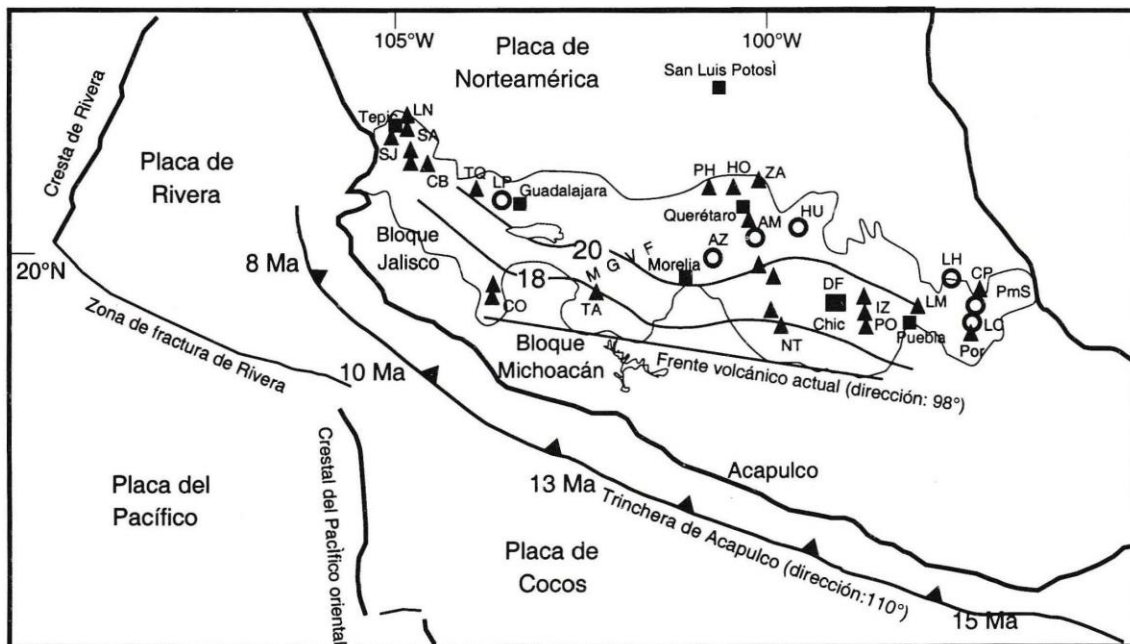


Figura 2.5. Entorno tectónico y principales centros volcánicos del Eje Neovolcánico. Los triángulos indican los principales estratovolcanes: CO, Volcán de Colima; NT, Nevado de Toluca; IZ, Iztaccíhuatl; PO, Popocatepetl; LM, La Malinche; CP, Cofre de Perote; Por, Pico de Orizaba. Los círculos indican las calderas: LP, La Primavera; AI, Los Azufres; LH, Los Humeros. Ferrari, L., 2000.

Los principales aparatos volcánicos que se localizan en esta provincia son estrato volcanes de dimensiones muy variables y pertenecen a esta categoría el Nevado de Colima y su prolongación meridional, el Volcán de Colima (únicos estrato volcanes grandes de la zona occidental del Eje); el Nevado de Toluca, el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y La Malinche, que están agrupados en la parte central; y la cadena Pico de Orizaba-Cofre de Perote, en la parte oriental del Eje Neovolcánico (Demant, A., 1978), todos ellos fueron edificados por emisiones alternantes de productos piroclásticos y derrames lávicos (INEGI y FI-UNAM, 1980).

Asimismo, existen evidencias de numerosas emisiones fisurales y de conos adventicios desarrollados en las laderas de los estrato volcanes. Además de este tipo de estructuras volcánicas y algunos volcanes en escudo, este sistema incluye sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, cuencas cerradas ocupadas por lagos y estructuras de calderas volcánicas

La composición petrográfica de las rocas que conforman al Eje Neovolcánico es muy variable, son abundantes los derrames y productos piroclásticos de composición andesítica, aunque también existen numerosas unidades dacíticas y aun riódacíticas. De manera general se puede observar que en los estrato volcanes predomina la composición andesítica a dacítica (Schaaf *et al.*, 2005), mientras que en los volcanes monogenéticos predominan las lavas de composición basáltica a andesítica (Demant, 1978, 1982; Luhr *et al.*, 1989; Wallace y Carmichael, 1999; Siebe *et al.*, 2004; Martínez-Serrano *et al.*, 2004; Schaaf *et al.*, 2005). También se han identificado productos félsicos (es decir, composición riolítica a dacítica) en las calderas y domos asociados (Demant, 1978; Ferriz, 1985).

La provincia del Eje Neovolcánico desde un punto de vista químico es considerada por numerosos autores como una provincia calcialcalina, caracterizada por su abundancia de andesitas y dacitas y por su relación que guardan sus contenidos de SiO_2 y $\text{NaO}_2+\text{K}_2\text{O}$ (INEGI y FI-UNAM, 1980).

2.3.2 Geología local

El municipio de Acajete debido a su proximidad al volcán La Malinche y en específico las localidades de San Juan Tepulco ubicado a una distancia de 13 km de la cima de este y San Jerónimo Ocotitlán a 23 km de la misma, resulta imprescindible tomar en cuenta la gran influencia del origen y evolución de esta estructura volcánica con respecto a la geología, morfología, estratigrafía, hidrología e hidrogeología de la zona de estudio. Además, investigaciones previas relacionadas con los temas antes mencionados están enfocados hacia la comprensión de la historia de La Malinche; sin embargo, muchas de estas investigaciones detallan las zonas aledañas a la estructura volcánica, siendo de interés para este trabajo de tesis el sector sureste que es la ubicación de las localidades objeto de estudio.

Los grandes volcanes del centro del país como La Malinche comenzaron a formarse a mediados del período Terciario, motivo por el cual se considerada como una de las primeras estructuras volcánicas que conformaron al Eje Neovolcánico. Las rocas más antiguas del área corresponden a una secuencia plegada de calizas estratificadas con intercalaciones de capas delgadas de areniscas y limolitas, las cuales conforman la base estratigráfica de la región. Las calizas presentan una textura sacaroide, contienen nódulos de pedernal y algunos de los estratos están enriquecidos en fósiles. Hacia el ESE del volcán (al E del cerro Pinal) afloran conglomerados sobre las calizas que de acuerdo a López Ramos (1979) las describe como calizas de tipo arrecifal de la Formación Orizaba del Cretácico medio, cuya distribución se restringe al SE del área (Figura 2.6). En el extremo sur de esta área afloran calizas del Cretácico superior de la Formación Maltrata (Erffa *et al.*, 1976, López Ramos, 1979). Estas calizas cretácicas se encuentran formando un relieve de lomeríos y montañas que están en contacto con los depósitos piroclásticos del mismo volcán y con las rocas volcánicas del Cuaternario (Figura 2.6).

Hacia el NE de La Malinche aflora una secuencia constituida principalmente por depósitos lacustres de arenas y limos finamente estratificados, la mayoría silicificados. Su cima incluye capas delgadas de depósitos fluviales, entre los cuales se encuentran algunos conglomerados. Algunas de las capas lacustres pudieron haber sido

originadas por emplazamiento de cenizas piroclásticas. De acuerdo a Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez (2000) estos depósitos lacustres presentan una edad del Mioceno tardío (no menos de 9.7 M.a.), asimismo esta secuencia es nombrada como secuencia Benito Juárez (Carrasco-Núñez, 1997); la cual se encuentra cubierta por las rocas del grupo Terrenate (lavas de color gris a gris oscuro, porfiríticas, de composición andesítica con piroxenos), de la andesita el Crestón y por depósitos piroclásticos y coluviales más recientes. Esta secuencia no se encuentra plegada, aunque si fallada en direcciones E-W, NW-SE y NE-SW.

Hacia el NW y el W de volcán aflora otra secuencia de depósitos lacustres finamente estratificados, que está constituida por capas de arena y de limo. Algunos de las capas parecen consistir en productos piroclásticos (cenizas y pómez). La secuencia lacustre está fallada en direcciones E-W, NW-SE y NE-SW y son considerados de edad terciaria Erffa *et al.*, (1976). Esta secuencia y la secuencia Benito Juárez, parecen ser contemporáneas; es decir, se depositaron en la misma cuenca (Castro-Govea, 2007). La silicificación parcial encontrada en esta última puede deberse a la intensa actividad ígnea posterior, que dio origen al Terrenate y a la andesita el Crestón. Como consecuencia del inicio de la actividad volcánica de La Malinche durante el Pleistoceno tardío-Holoceno (Castro-Govea & Siebe, 2007) se encuentran depósitos de materiales de tipo piroclástico y de flujos de nubes ardientes, consistentes en cenizas, lapillis y bloques. Es en este período en donde se presenta con mayor intensidad la actividad eruptiva de la mayoría de las estructuras volcánicas del Eje Neovolcánico (Demant, 1978; Lugo-Hubp, 1990).

La distribución de los depósitos piroclásticos del volcán La Malinche son muy variables alrededor de sus laderas así como en las zonas adyacentes a la estructura, llegando a cubrir parte importante de los valles que se forman en los estados de Puebla y Tlaxcala; debido esencialmente al tiempo de duración de los eventos volcánicos, la dirección predominante de los vientos durante estos eventos, así como de los procesos de intemperismo y erosión a los que han estado sometidos dichos materiales, dando como resultado espesores importantes de materiales aluviales, los cuales actualmente son explotados como bancos de material para la industria de la construcción.

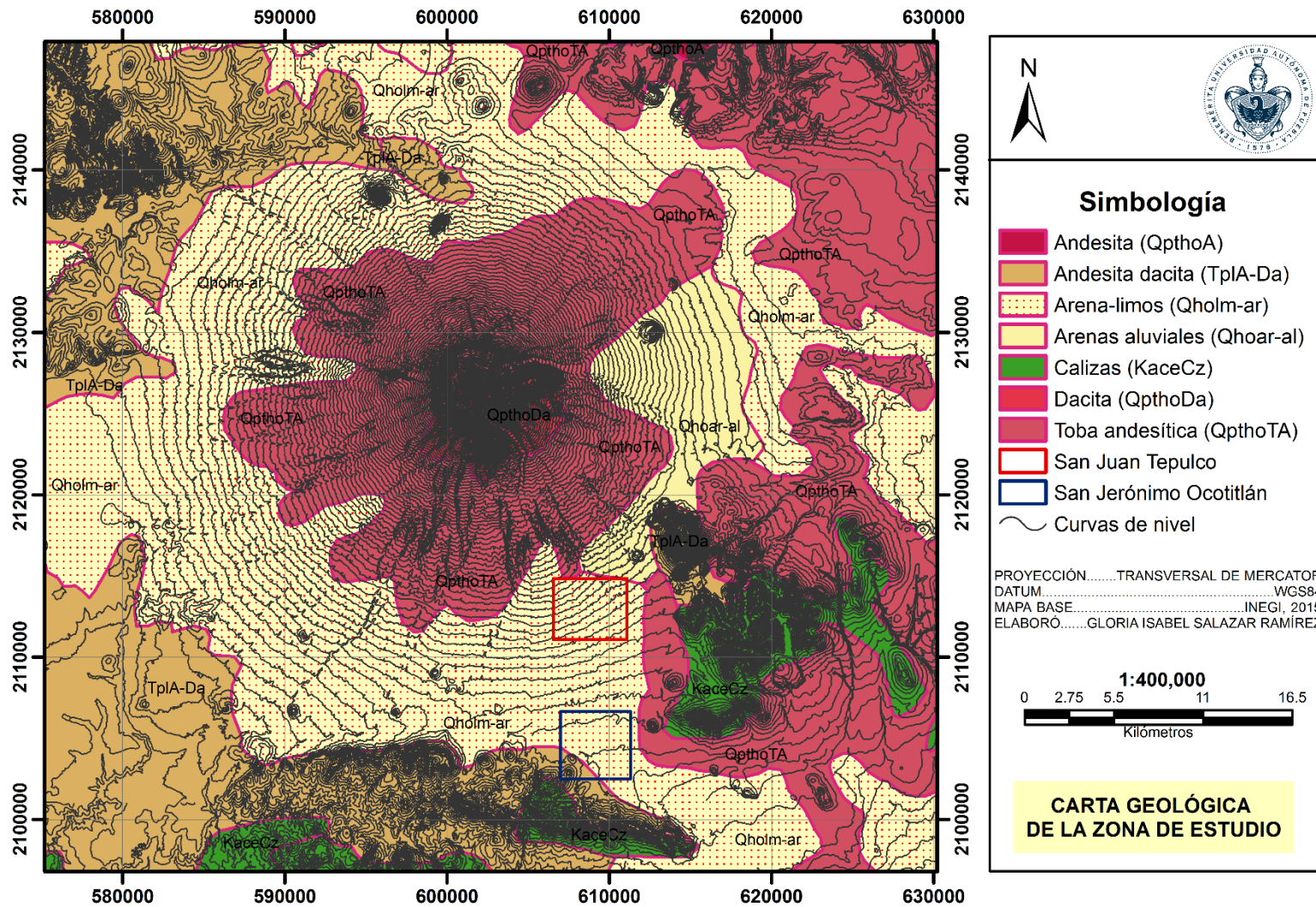


Figura 2.6. Mapa geológico de la zona de estudio.

2.3.2.1 Historia eruptiva de La Malinche

Castro-Govea y Siebe han estudiado en las últimas décadas la historia eruptiva de La Malinche y a partir de estudios previos de petrología y geoquímica (Weyl, 1974), datación radiométrica y estratigrafía (Heine, 1971; Heine y Heide, 1972; Castro-Govea y Siebe, 2007); han propuesto dividir el proceso eruptivo en dos etapas: pre-Malinche y Malinche. La etapa Malinche a su vez la han subdividido en tres períodos y cada uno de ellos ha sido nombrado de forma informal como Malinche, Malinche I y Malinche II; en base en los depósitos de caída de pómez de mayor dispersión y espesor, originados por erupciones de tipo pliniano.

Castro-Govea y Siebe (2007) proponen una columna litológica compuesta por los depósitos de las erupciones más importantes que han logrado reconocer en el volcán y en las zonas adyacentes a este (Figura 2.7). En esta secuencia no se encuentran descritos muchos otros depósitos existentes debido a que se desconoce su edad y sus relaciones estratigráficas, y por tanto no se representan en la secuencia estratigráfica. El depósito más antiguo corresponde a la etapa pre-Malinche y se trata de una unidad muy extensa de pómez de caída denominado como Pómez Baquedano (PB). El depósito de caída nombrado como Pómez Huamantla (PH) marca el límite entre las dos etapas eruptivas (pre-Malinche y Malinche), además de representar el inicio del primer período de la etapa Malinche (PM). El segundo período nombrado como Pómez Malinche I (PMI) es una unidad de pómez de caída que constituye un buen horizonte en las laderas del volcán. En el tercer período se encuentra una pómez de caída muy notoria por contener una unidad marcadamente estratificada y es denominado como Pómez Malinche II (PMII).

En la actualidad se tiene la idea de que La Malinche es un volcán extinto; debido a que este volcán no presenta un cráter central, ni fumarolas o algún tipo de actividad que haga pensar que sea un volcán activo; asimismo de que aparentemente no existan registros históricos de alguna erupción que haya sido presenciada por el hombre. Sin embargo, estudios recientes sugieren que éste debe ser considerado como un volcán activo, actualmente en reposo (Castro-Govea y Siebe, 2007; Nelson, 1990).

Por otra parte, en el año 2015 investigadores de la UNAM y de la BUAP realizaron un estudio gravimétrico-magnético en las inmediaciones de dicha estructura volcánica con la finalidad de determinar las causas de los sismos registrados recientemente en el volcán, obteniendo como resultado que estas manifestaciones son muy someras lo cual no guarda relación con el ascenso de magma; no obstante, se recomienda a los habitantes estar atentos al comportamiento del volcán.

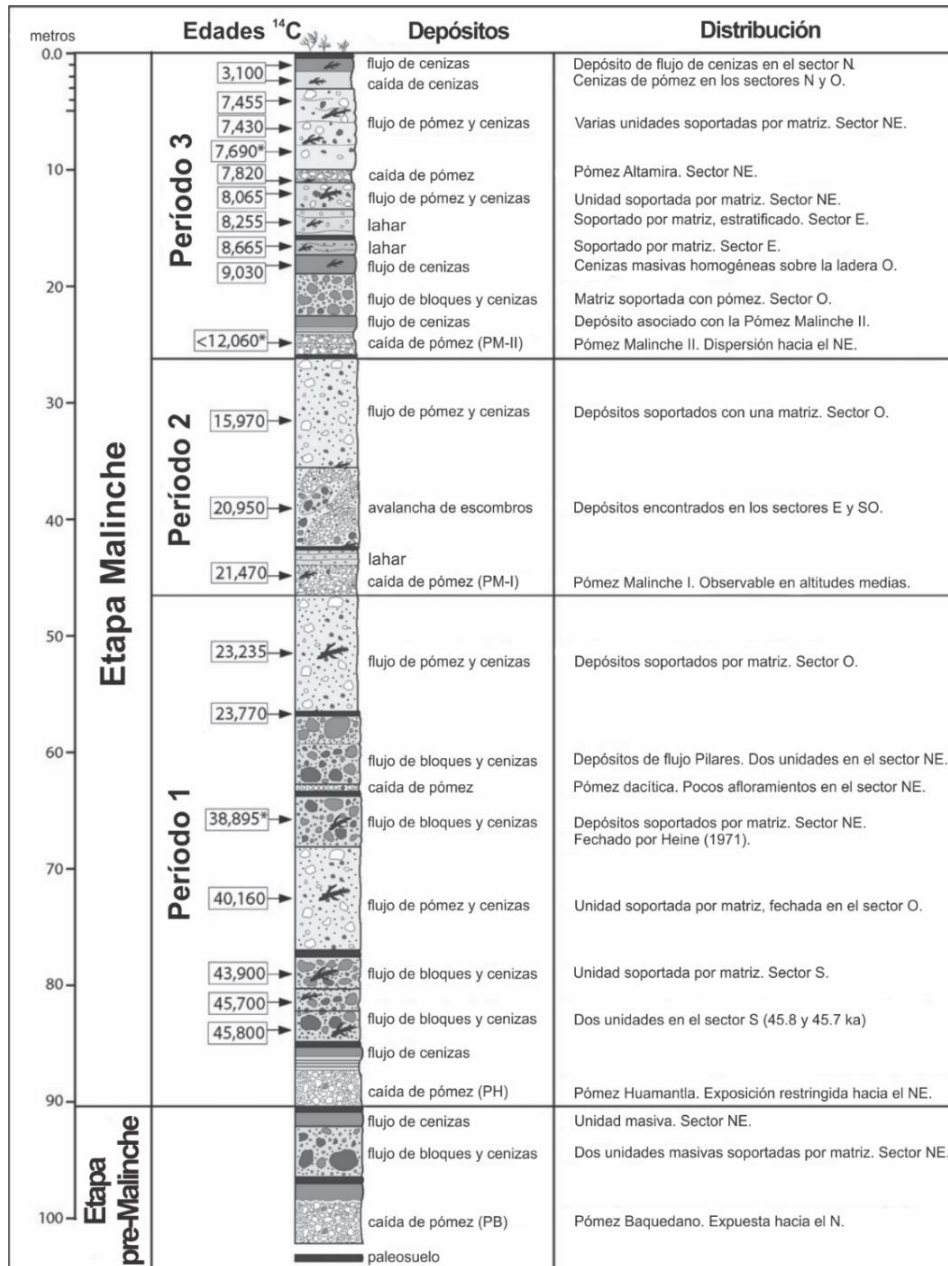


Figura 2.7. Sección estratigráfica de los depósitos volcánicos más representativos de La Malinche. Castro-Govea y Siebe (2007).

2.4 Estratigrafía

Estratigráficamente no es bien conocida la base sobre la cual comenzó a edificarse La Malinche, pues sus depósitos cubren casi cualquier vestigio. Sin embargo, rocas sedimentarias que afloran cerca del edificio volcánico constituyen indicios probables de la base (Castro-Govea, 1999). También afloran conglomerados, areniscas y pelitas calcáreas de la Formación Mexcala (de edad senoniana) al sur del Cerro Amozoc y al este del Cerro El Pinal. Estas mismas rocas fueron descritas por López Ramos (1979) como calcáreas de la Formación Orizaba pertenecientes al Cretácico superior, la existencia de estas rocas a profundidad, debajo de La Malinche, se interpreta por la presencia de xenolitos que incluyen fragmentos de calizas cretácicas con nódulos de pedernal en los depósitos del Cerro Xalapaxco (Abrams y Siebe, 1994). En el valle del Atoyac afloran areniscas, conglomerados, esquistos y calizas de la Formación Mexcala (Hilger, 1973).

Hacia el NW (en las inmediaciones y al N de la ciudad de Tlaxcala) están expuestos sedimentos lacustres constituidos, en su mayoría, por depósitos piroclásticos granulosos, limosos y arcillosos; estos son considerados de edad terciaria por von Erffa *et al.*, (1976), mientras que Hilger (1973) los considera de edad cuaternaria. Hacia el noreste de Huamantla, afloran rocas ígneas que Carrasco-Núñez *et al.*, (1977) nombra Andesita El Crestón y las describe como depósitos de flujos de lava andesítica del Mioceno tardío. Igualmente, en esta misma región pero con mayor área, Carrasco-Núñez *et al.*, (1977) mapearon una unidad cuaternaria, no dividida, de depósitos aluviales y piroclásticos. Esta misma unidad, Erffa *et al.*, (1976) la consideran constituida por depósitos lacustres que subyacen a tobas. La estratigrafía del volcán está compuesta principalmente por depósitos piroclásticos de composición dacítica/andesítica. No se han observado depósitos de flujos de lava, aunque es probable que existan y no afloren por estar cubiertos por depósitos piroclásticos más jóvenes. La única lava observada es la del domo dacítico que conforman la cima.

A continuación, se detalla cada una de las unidades estratigráficas representativas del área de estudio de acuerdo a afloramientos presentes en el sector sureste del volcán La Malinche.

Formación Orizaba

Viniegra (1965) menciona que esta unidad es del Cretácico temprano (Albiano)-Cretácico tardío (Cenomaniano). Se encuentra ampliamente distribuida en el estado de Veracruz, en La Malinche (Aguilera-Martínez *et al.*, 2000) así como al sureste de Tecamachalco. Su localidad tipo es el Cerro de Escamela al noroeste de la ciudad de Veracruz (Aguilera-Martínez *et al.*, 2000).

Los estratos más gruesos corresponden a una caliza de color oscuro con rudistas, en cambio los horizontes más delgados comprenden calizas de color más claro que varía de gris crema a gris achocolatado claro, con miliólidos. Estudios más detallados consideran que se trata de una caliza de color gris claro a oscuro y se divide en dos facies: una de tipo arrecifal, que está constituida por boundstone de rudistas asociados con gasterópodos presentándose en bancos de 2 a 4 metros de espesor; y otra facie de tipo post-arrecifal, que consiste de mudstone y wackstone de intraclastos y bioclastos, presenta estructuras sedimentarias tales como carpetas de algas, costras de dolomita. Se observa la presencia de bandas y nódulos de pedernal, interdigitalizada con estratos de caliza arrecifal, mostrando efectos del proceso de disolución (CONAGUA, 2002), fracturas rellenas de calcita (Aguilera-Martínez *et al.*, 2000; Martínez-Amador e Islas-Tenorio, 2002) e impresiones de fósiles silicificados (Martínez-Amador *et al.*, 2000; Martínez-Amador e Islas-Tenorio, 2002). Asimismo, esta unidad subyace concordantemente a la formación Maltrata y Guzmantla-Tecamalucan (Martínez-Amador *et al.*, 2000).

Formación Maltrata

Esta unidad se distribuye en los estados de Veracruz y Puebla. Se le ha asignado una edad correspondiente al Cretácico tardío (Turoniano-Coniaciano), con base en microfósiles (PEMEX, 1988). Böse en 1989 documentó que la localidad tipo de esta formación se encuentra ubicada en las cumbres de Maltrata, Veracruz.

Böse (1989) describe que ésta unidad está constituida en su mayor parte por calizas en lechos delgados, sin fósiles, de color gris claro, gris oscuro o negro; las cuales contienen numerosas segregaciones de pedernal en forma de lechos; en las partes

superiores este pedernal se observa en forma de nódulos o riñones irregulares; en la parte inferior entre la caliza se encuentran intercaladas pizarras arcillosas, amarillas, con lustre de seda, en bancos no muy gruesos. Por su parte, López Ramos (1979) documenta que la litología está constituida por calizas con pedernal negro de la serie Maltrata, con estratificación delgada hacia la base con intercalaciones de pizarra arcillosa de color amarillo, hacia la parte superior se presentan calizas gruesas, dolomitizadas de color gris oscuro, con escasos nódulos de pedernal negro, que marcan el paso a las calizas de la Formación Escamela inferior.

Unidad eruptiva La Malinche

La estratigrafía en particular del volcán La Malinche se caracteriza por la ocurrencia de diversos tipos de depósitos piroclásticos y por la ausencia de afloramientos de flujos de lava. Aunque es posible que el emplazamiento de flujos de lava haya sucedido antes del período Pleistoceno tardío-Holoceno, hasta ahora sólo se ha podido describir la lava dacítica que constituye al domo de la cima del volcán (Castro-Govea, 1999).

La secuencia de unidades eruptivas tiene como base a la Pómez Baquedano (PB) que corresponde a una unidad muy extensa de pómez de caída, aflora ampliamente hacia el norte del volcán. Por lo general el depósito es masivo con gradación normal en la cima; se compone principalmente de lapilli de pómez blanca muy vesiculada, y en menor cantidad de fragmentos subangulares y alterados de lava andesítica-dacítica que son de menor tamaño que los fragmentos de pómez. La Pómez Huamantla (PH; >45 ka) marca el inicio del primer período, es un depósito grueso de caída que aflora en el sector NE; esta secuencia consta de cuatro unidades caracterizadas por ser depósitos de caída de pómez blanca y de cenizas de color gris a blanco. La Pómez Malinche I (PMI; 21.47 ka) es una unidad de caída de pómez que representa un buen horizonte índice en las laderas del volcán; en la región norte del volcán la unidad se compone de dos capas con gradación normal mientras que al sur del volcán tiene un aspecto masivo; la unidad está constituida por lapilli y cenizas de pómez blanca. La Pómez Malinche II (PMII; <12.06 ka, >9.03 ka) es representada por una pómez de caída marcadamente estratificada, de color ocre amarillento, expuesta principalmente

en el sector norte del volcán y se compone principalmente de dos unidades de caída y una de flujo que les sobreyace.

2.5 Geología estructural

En zonas aledañas a la región norte de La Malinche, se describen fallas normales de dirección NNE-SSW (García-Palomo *et al.*, 2002) y de dirección NW-SE y NE-SW (Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez, 2000). Además La Malinche parece encontrarse en la parte baja del Graben de Puebla orientado E-W (Mooser *et al.*, 1996; Santoyo *et al.*, 2005), el cual se encuentra limitado por un sistema de fallas normales de igual dirección como son la Falla Tlaxcala y la Falla Zacatelco en el estado de Tlaxcala y la Falla de Huejotzingo y la Falla de Tepeaca en Puebla, observadas al norte y al sur del volcán respectivamente (Seele y Mooser, 1972; Mooser *et al.*, 1996; Santoyo *et al.*, 2005; Castro-Govea y Siebe, 2007; Figura 2.8).

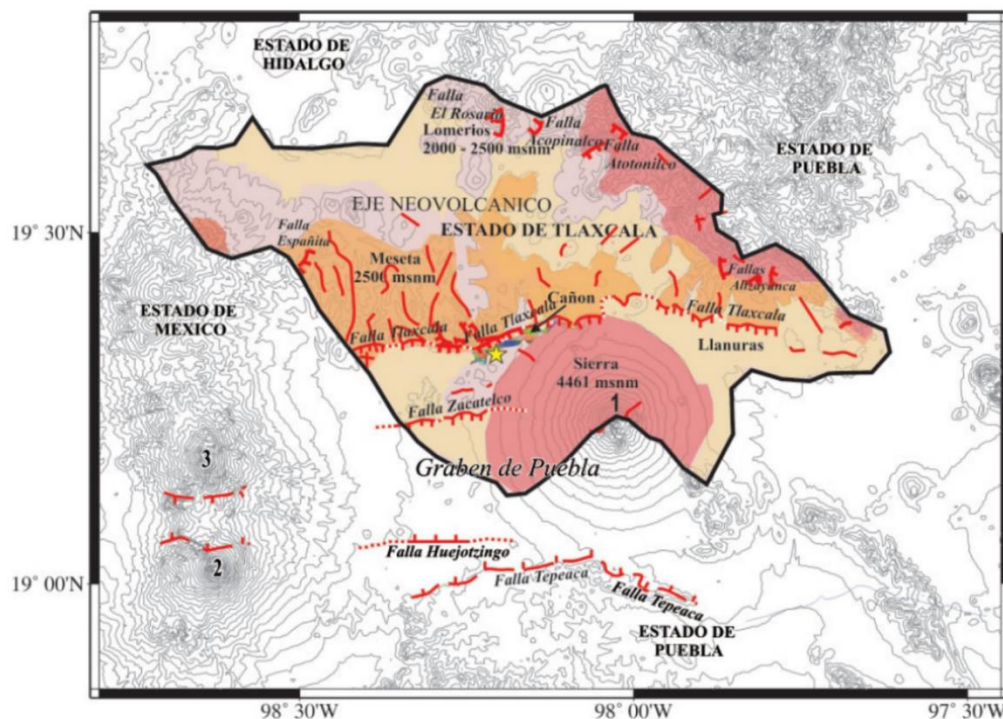


Figura 2.8. Ubicación de La Malinche en la parte baja del Graben de Puebla como resultado del sistema de fallas Tlaxcala, Zacatelco, Huejotzingo y Tepeaca. Los números 1, 2 y 3 indican la ubicación de los volcanes La Malinche, Popocatepetl e Iztaccíhuatl respectivamente. (Lermo-Samaniego y Bernal-Esquía, 2006).

2.6 Clima

Los principales tipos de clima según la clasificación de Enriqueta García (1989) para la región de Puebla-Tlaxcala son:

C(w₂). **Clima templado subhúmedo con lluvias en verano.** Es característico por poseer una temperatura media anual entre 11 y 17°C; la temperatura del mes más frío es entre 3 y 18°C, observándose en este período que la precipitación invernal con respecto a la anual es menor en un cinco por ciento.

Este clima se presenta en la mayor parte del municipio de Acajete, a pesar de ello existe una diferencia de humedad conforme las localidades se encuentran más distantes a las laderas de La Malinche, por tanto en la comunidad de San Juan Tepulco se registra una humedad del 80% mientras que en San Jerónimo Ocotitlán es del 16% (Figura 2.9). Sin embargo; este clima continua al presentarse un gradiente altitudinal entre 2 500 y 3 000 m.s.n.m.; es decir, en las laderas bajas de La Malinche y comprende a los municipios de Acajete, Amozoc de Mota, Tepatlaxco de Hidalgo y Puebla. La temperatura media anual varía entre 10 y 16°C, siendo los meses de marzo a julio los más calurosos; la precipitación media anual oscila entre 700 y 1 000 milímetros, los meses más lluviosos son de mayo a octubre y otras veces sólo a septiembre; el rango de frecuencia de heladas va de 40 a 60 días, sobre todo en invierno, lo que ocasiona daños sobre las zonas agrícolas; los vientos dominantes provienen del noreste y noroeste en primavera y verano, y del sureste en el otoño e invierno; a los 3 000 metros de altitud el clima tiende a ser semifrío, con una temperatura media anual de 11°C.

Cb'(w₂). **Clima semifrío y subhúmedo con lluvias en verano.** Representado por una temperatura media anual entre 5 y 12°C; la temperatura del mes más frío es entre -3 y 18°C; la precipitación invernal es un cinco por ciento menor con respecto a la precipitación anual; la precipitación del mes más seco es menor a los 40 milímetros. Este clima se encuentra en las faldas superiores de La Malinche, así como también en la Sierra Nevada.

Este tipo de clima predomina entre 3 000 y 3 500 m.s.n.m., altitudes en donde se localizan los extremos norte de los municipios cuyo territorio incluye las laderas superiores y la cima del volcán La Malinche, tales como: Acajete, Tepatlaxco de Hidalgo y Puebla. En estos municipios el clima semifrío y subhúmedo con lluvias en verano tiene la particularidad de presentar una temperatura media anual entre 6 y 8°C; una precipitación media anual entre 800 y 1 000 milímetros; de 100 a 120 días de heladas moderadas y fuertes, sobre todo en invierno; en esta zona predomina el bosque de pino-oyamel.

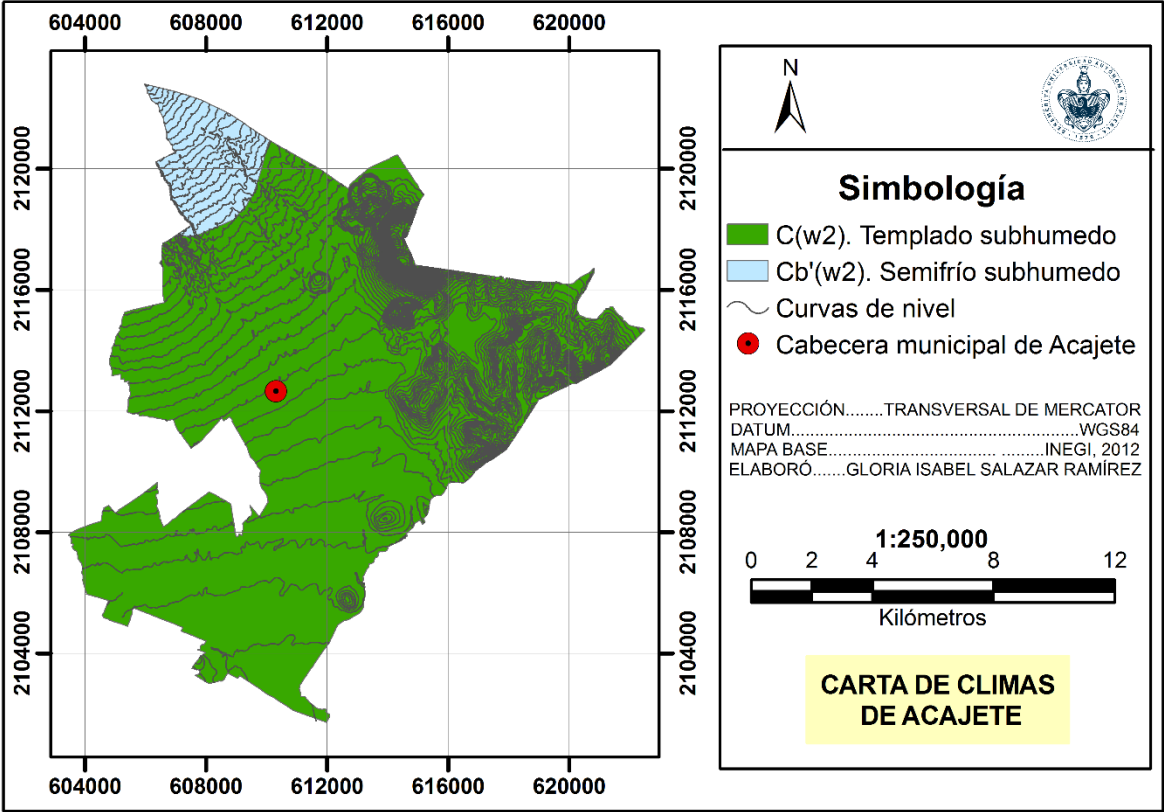


Figura 2.9. Climas presentes en el municipio de Acajete.

2.7 Hidrología

CONAGUA (2012) con la finalidad de tener un mejor conocimiento de la disponibilidad y manejo de la administración de las aguas nacionales ha dividido al país en diversas regiones hídricas; dando como resultado que el municipio de Acajete

pertenezca en su totalidad a la Región Hidrológico Administrativa (RHA): IV Balsas, que a su vez está constituida por la Región Hidrológica: No.18 Balsas (RH-18). Dentro de esta región hidrológica se encuentra comprendida la cuenca del Río Bajo Atoyac, la cual coincide con la misma cobertura de la región hidrológica, ambas cubren el 100% de la superficie del municipio; a su vez en esta cuenca se localizan las subcuencas Río Atoyac-Balcón del Diablo abarcando un 96% de la superficie municipal y la Laguna de Totolcingo con un 4%.

Tabla 2.1. División de las aguas superficiales presentes en el municipio de Acajete. CONAGUA, 2013.

	Región hidrológica	Cuenca	Subcuencas
Acajete	RH-18 Alto Balsas	Río Bajo Atoyac	Río Atoyac-Balcón del Diablo Laguna de Totolcingo

La cercanía del municipio de Acajete a La Malinche, así como la geomorfología de este volcán, son factores que condicionan en gran medida la disponibilidad del agua en esta región. De acuerdo a INEGI (1986), esto se debe a que las faldas inferiores de La Malinche se tienden radialmente con pendientes poco pronunciadas, en tanto sus laderas centrales a partir de unos 3 300 m.s.n.m. son muy pronunciadas y se levantan hasta los 4 461 metros de altitud; dando como resultado un drenaje muy rápido, así como también a que no existan corrientes de agua permanente y solamente se presenten corrientes intermitentes. La mayoría de estos cauces han perdido la capacidad de conducción debido al arrastre de sedimentos que se originan en la parte alta del volcán y que se depositan a lo largo del cauce.

Desde un punto de vista local, el drenaje presente en San Juan Tepulco es de tipo rectangular con cauces medianamente profundos a profundos cuyo dren tiene la misma dirección que las pendientes de las laderas de La Malinche; en cambio, en San Jerónimo Ocotitlán no se observa un determinado tipo de drenaje ya que este es incipiente, presentando como único escurrimiento natural el que se aprecia en la

barranca conocida como El Águila, localizada al sur de la comunidad y cuya dirección de flujo es de W-E; esta corriente superficial nace en la parte sur de La Malinche y se forma por los escurrimientos que nacen en sus faldas (Figura 2.10).

Las fuentes de abastecimiento y el volumen de extracción promedio de agua potable en los estados de Puebla y Tlaxcala demuestran la gran importancia que tiene La Malinche como abastecedora de este recurso. Asimismo, se considera una fuente de suministro importante, al aportar volúmenes considerables de agua subterránea a la presa Manuel Ávila Camacho (López-Domínguez y Acosta, 2004).

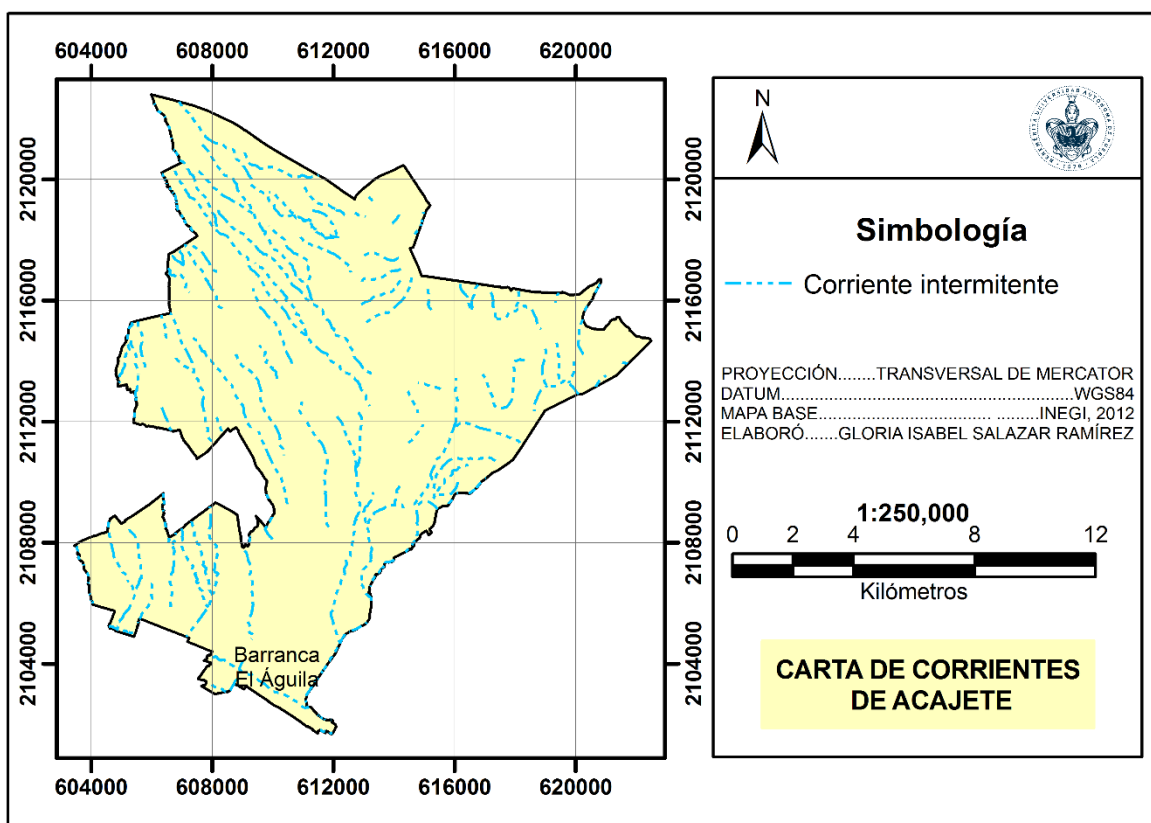


Figura 2.10. Corrientes de agua de tipo intermitente que presenta el municipio de Acajete, principalmente durante el período de lluvias.

2.8 Hidrogeología

El municipio de Acajete se encuentra comprendido en su totalidad dentro de acuífero denominado Valle de Tecamachalco identificado con la clave 2101 (Figura 2.10), el cual desde el año de 2009 está catalogado en un estado de sobreexplotación, situación que está en función de la relación extracción/recarga (CONAGUA, 2013). El acuífero de Tecamachalco está conformado por rocas calcáreas con la presencia de materiales detríticos sedimentarios que se han agrupado genéricamente como rocas calcáreas del Cretácico. Las calizas arrecifales de la formación Orizaba se cree que constituyen la parte inferior del acuífero regional.

Actualmente en el municipio de Acajete el aporte de agua potable es proveniente del Sistema La Floresta Malinche, conformado por tres pozos profundos ubicados en el municipio de Nopalucan, este mismo sistema también suministra del recurso hídrico a los municipios de Tepatlaxco de Hidalgo y Amozoc.

Cabe señalar que la comunidad de San Juan Tepulco no cuenta con algún pozo perforado mientras que en San Jerónimo Ocotitlán se encuentra el Pozo del Parque, ubicado en el centro de dicha comunidad cuyas coordenadas UTM son: 609195 E, 2104642 N, con 2 296 m.s.n.m., de altitud, cuenta con una profundidad total de 130 metros, un nivel estático a los 100 metros aproximadamente y un caudal de explotación de 5 lps, el cual ha disminuido considerablemente en los últimos años; estos datos fueron proporcionados por los pobladores de la comunidad (Anexo I, Fotografía No.33). Asimismo, en San Jerónimo Ocotitlán se llevó a cabo hace 15 años la perforación de un pozo profundo conocido como Pozo Bachilleres con coordenadas geográficas: 19° 01' 44.1" de latitud norte y 97° 57' 58.60" de longitud oeste, con 2 299 m.s.n.m., de altitud; durante su perforación se presentaron derrumbes por lo que la profundidad total quedó en 150 metros, además el aforo resultó negativo, quedando en consecuencia en desuso, esta información fue proporcionada por los pobladores (Anexo I, Fotografía No. 34).

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

3 Marco teórico

3.1 Prospección geoelectrica

Existe una gran variedad de métodos eléctricos, algunos utilizan las diferencias de potencial naturales que suelen existir entre dos puntos cualesquiera del terreno (Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R., 1990) mientras que otros requieren la introducción de una corriente generada artificialmente en la superficie al subsuelo (Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I., 2002). Sin embargo, lo que hace que esta técnica sea posible es la variación de la conductividad eléctrica presente en los diferentes tipos de minerales y rocas (Telford *et al.*, 1990). En la Tabla 3.1 se muestran algunos de los diferentes métodos que corresponden a la prospección geoelectrica. Estos métodos se encuentran clasificados de acuerdo a la fuente de energía generadora de la corriente eléctrica, natural o artificial; así como el tipo de corriente que es utilizada, continua o alterna.

Tabla 3.1. Clasificación de los métodos geoelectricos de acuerdo a la fuente generadora y al tipo de corriente.

Corriente	Fuente	
	Natural	Artificial
Continua	-Potencial espontáneo (SP)	-Resistividad: SEV y Calicatas -Polarización inducida (IP)
Alterna	-Corrientes telúricas -Corrientes magnetotelúricas (MT) -Audio frecuencia magnética (AFMAG)	-Polarización inducida (IP)

El método que a continuación se describe es el de Resistividad, debido a que fue el que se empleó para el desarrollo de esta tesis en su modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), este último se describirá en temas posteriores.

3.2 Métodos de resistividad

Todos los métodos de resistividad emplean como fuente una corriente eléctrica generada artificialmente en la superficie del terreno por medio de una serie de pilas o un motogenerador, la cual es introducida al subsuelo a través de un par de electrodos (AB). El potencial resultante es medido en la superficie por un voltímetro de alta precisión a través de un par de electrodos no polarizables (MN) que se encuentran cercanos a la región del flujo de la corriente eléctrica inyectada (Figura 3.1). A partir del análisis de la información obtenida mediante este procedimiento se llega a conocer la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, asimismo se puede determinar de acuerdo a los objetivos del estudio y a las evidencias geológicas en superficie las características geológicas del subsuelo.

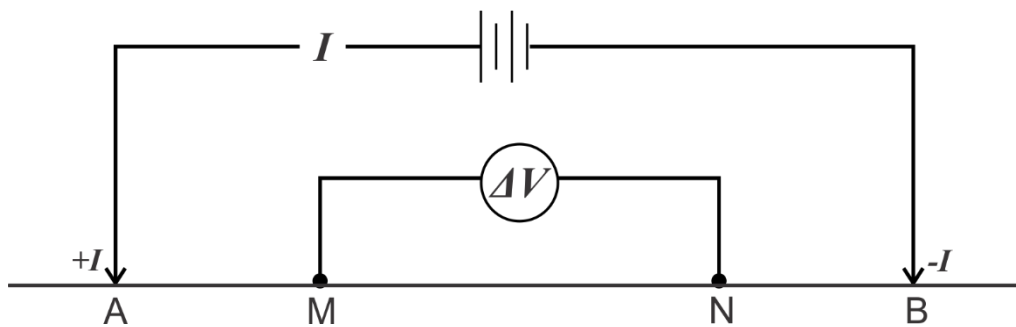


Figura 3.1. Forma generalizada de la configuración electródica utilizada en la medición de la resistividad en el subsuelo (Kearey, *et al.*, 2002).

La técnica de Resistividad es utilizada ampliamente en hidrogeología para la búsqueda de agua subterránea y determinar si esta es dulce o salada, así como también para el monitoreo de contaminantes en el agua; en estudios de ingeniería civil se emplea para localizar fallas, fracturas, cavidades en el subsuelo; en arqueología para el mapeo de restos de cimientos enterrados de antiguas edificaciones; en minería para la prospección de yacimientos minerales conductores; entre muchas otras aplicaciones.

3.2.1 Resistividad

La resistividad es el parámetro petrofísico que el método de Resistividad emplea (Kirsch, R., & Ernstson, K., 2009). Los métodos eléctricos de corriente continua

tienen como base la Ley de Ohm (Orellana, E., 1972; Ecuación 3.1), la cual establece que la resistencia (R) es directamente proporcional al voltaje (V) e inversamente proporcional a la intensidad de corriente (I).

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

donde R es la resistencia eléctrica (ohms, Ω), V es el voltaje (volts, V) e I es la intensidad de corriente eléctrica (amper, A) en el SI.

La relación anterior (Ecuación 3.1) es válida para cualquier circuito eléctrico; sin embargo, en estudios del subsuelo la relación cambia, ya que la resistencia es función de la naturaleza y de la geometría del conductor, que en este caso es la Tierra (Ecuación 3.2). Dando como resultado que la resistencia (R) es proporcional a la longitud (L) del material resistivo e inversamente proporcional al área de la sección transversal (S) (Figura 3.2). La constante de proporcionalidad es denominada como resistividad (ρ).

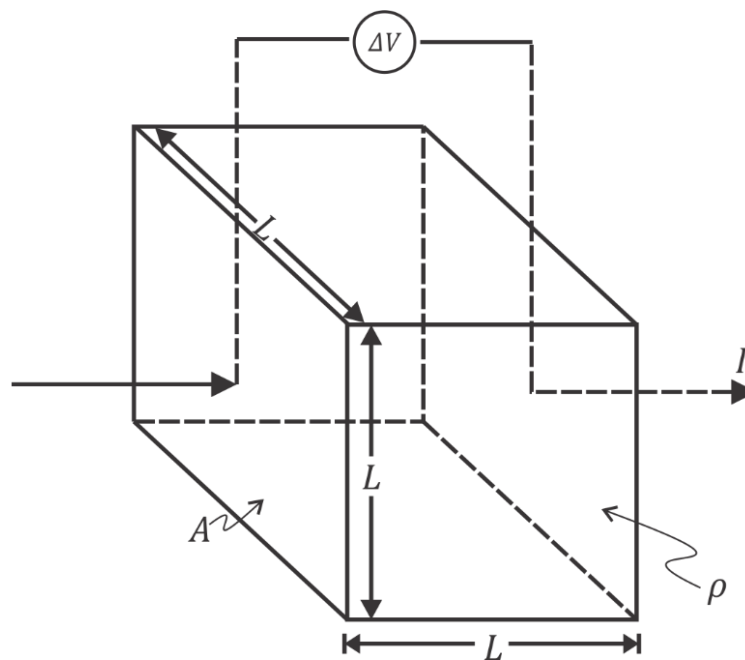


Figura 3.2. Sí se considera un cubo eléctricamente uniforme de longitud L por lado a través del cual una corriente eléctrica (I) está pasando. El material dentro del cubo resiste la conducción de la electricidad a través de él, resultando en un decaimiento del potencial (V) entre las caras opuestas (Reynolds, J., 1998).

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (3.2)$$

donde ρ representa la naturaleza del conductor y se denomina resistividad, L es la longitud del conductor y S el área de la sección transversal del conductor.

De acuerdo a la Ley de Ohm, la relación del decaimiento del potencial a la corriente aplicada (V/I) también define la resistencia de un cubo y sustituyendo 3.1 en 3.2 se obtiene la Ecuación 3.3:

$$\frac{V}{I} = \rho \left(\frac{L}{S} \right) \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{V S}{I L} \quad (3.4)$$

Despejando ρ de la ecuación 3.3 se obtiene la forma de cómo calcular la resistividad (Ecuación 3.4) y de acuerdo a Reynolds, J., (1998) es igual al producto de una resistencia (ohm, Ω) y una distancia (metros, m), de ahí que la unidad de la resistividad sea el ohm-metro (Ωm).

3.2.2 Resistividad aparente

Las ecuaciones antes descritas son válidas únicamente cuando el medio es homogéneo. El subsuelo debido a su naturaleza presenta grandes variaciones en sus propiedades físicas y químicas, considerándose por tanto como un medio con falta de homogeneidad. Esta heterogeneidad en el subsuelo es consecuencia de la presencia de una gran cantidad de factores, tales como: la porosidad, las fracturas y fallas, la presencia de agua en los intersticios de las rocas y el contenido de sales disueltas en el agua, la compactación del material, la temperatura, la presión, la textura, la inclusión de minerales arcillosos, etc.; estos factores de manera individual o conjunta influyen en los valores de la resistividad de las rocas y minerales, ya sea incrementándolos o disminuyéndolos. Por lo anterior, cuando se realiza la toma de datos en campo lo que

se calcula es una resistividad aparente (ρ_a) y no la resistividad verdadera de los materiales presentes en el subsuelo.

La resistividad aparente considera las variaciones que podría tener la relación $\Delta V/I$ (Reynolds, J., 1998) así como también la influencia de la posición relativa de los electrodos en superficie (Kearey *et al.*, 2002) con respecto a las unidades geológicas; es decir, que también la forma de la diferentes unidades geológicas contribuyen a los valores de resistividad aparente (Kirsch *et al.*, 2009), dando como resultado un valor diferente de ρ_a para cada medición (Telford *et al.*, 1990). Generalmente, la ecuación 3.5 se utiliza para calcular la resistividad aparente sin importar el tipo de configuración electródica que se emplee (Kearey *et al.*, 2002; Telford *et al.*, 1990; Figura 3.3).

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}} \quad (3.5)$$

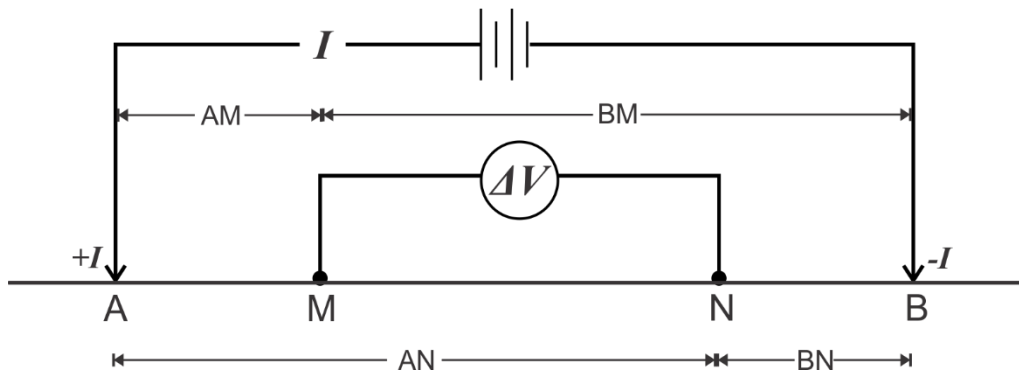


Figura 3.3. Separación entre los electros de corriente y voltaje AM, BM, AN y BN, utilizadas para el cálculo de la resistividad aparente.

donde AM, BM, AN y BM representan la distancia o separación entre los electros de corriente y voltaje correspondiente.

Además si $k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)}$; entonces la ecuación 3.5 se convierte en:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} k \quad (3.6)$$

A partir de la ecuación 3.6, se tiene que la resistividad aparente resulta ser el valor obtenido del producto de una resistencia medida (R) y un factor geométrico (k) para cualquier arreglo electródico dado (Reynolds, J., 1998), en donde el factor geométrico toma en cuenta la geometría de los arreglos electródicos y tiene como unidad de longitud al metro (m), por lo que las unidades de la resistividad aparente (ρ_a) son el ohm-metro (Ωm).

Existen diferentes tipos de arreglos electródicos que son empleados para la adquisición de los datos de resistividad en campo, pero para la realización de este trabajo de tesis el utilizado fue el arreglo Schlumberger con el procedimiento de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs). La conjunción de este arreglo con el procedimiento de sondeos es ampliamente utilizada en la prospección de aguas subterráneas a nivel mundial y debido a la gran eficacia que presenta cuando se lleva a cabo de forma correcta con la interpretación y la correlación geológica de la zona de estudio; constituyeron las razones por las que se decidió utilizar esta técnica para así lograr el objetivo de la determinación de los sitios más favorables para la perforación de un pozo profundo en las comunidades de San Juan Tepulco y de San Jerónimo Ocotitlán.

3.2.2.1 Arreglo Schlumberger

Para la obtención de la resistividad aparente por medio del arreglo Schlumberger (ecuación 3.7) al considerar una posición de los electrodos simétrica con respecto a un punto fijo o también denominado como punto de atribución, se utiliza la configuración en la que el espaciamiento entre los electrodos de potencial (MN) es igual a $2l$, la cual es una separación pequeña comparada con la existente entre los electrodos de corriente (AB) que es de $2L$ (Milsom, J., 2003; Kearey *et al.*, 2002; Reynolds, J., 1998; Telford *et al.*, 1990; Figura 3.4). Asimismo, durante la adquisición de los datos se debe tener presente la relación entre la separación de los electrodos

de corriente y de potencial con respecto al punto fijo de $L \geq 5l$, con la finalidad de que la señal de voltaje sea la adecuada para ser medible.

$$\rho_a = \left[\frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l} \right] \frac{\Delta V}{I}; \quad L \geq 5l \quad (3.7)$$

donde el factor geométrico k en el arreglo Schlumberger es igual a:

$$k_{Schlumberger} = \frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l} \quad (3.8)$$

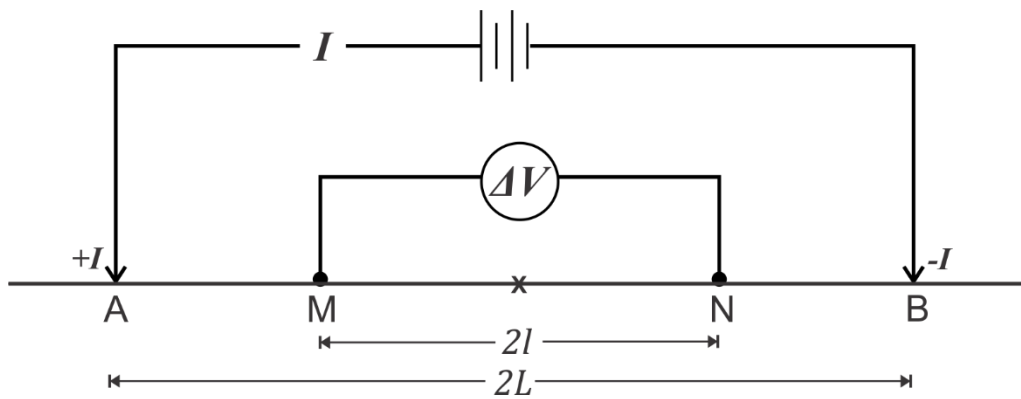


Figura 3.4. Configuración eléctrica Schlumberger.

3.2.3 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)

Los sondeos eléctricos verticales (SEVs) proporcionan información en una dimensión (1D), ya que permiten conocer la distribución vertical de las resistividades del subsuelo bajo un punto estudiado (Orellana, E., 1970). En el caso del arreglo Schlumberger, esto se logra para cada medición al dejar fijos los electrodos de potencial (MN), colocados simétricamente con respecto del centro del sondeo y aumentar el espaciamiento entre los electrodos de corriente (AB), lo que permite incrementar la penetración de las líneas de corriente y de esta forma aumentar la

influencia de las capas más profundas en la resistividad aparente (Kirsch *et al.*, 2009; Figura 3.5).

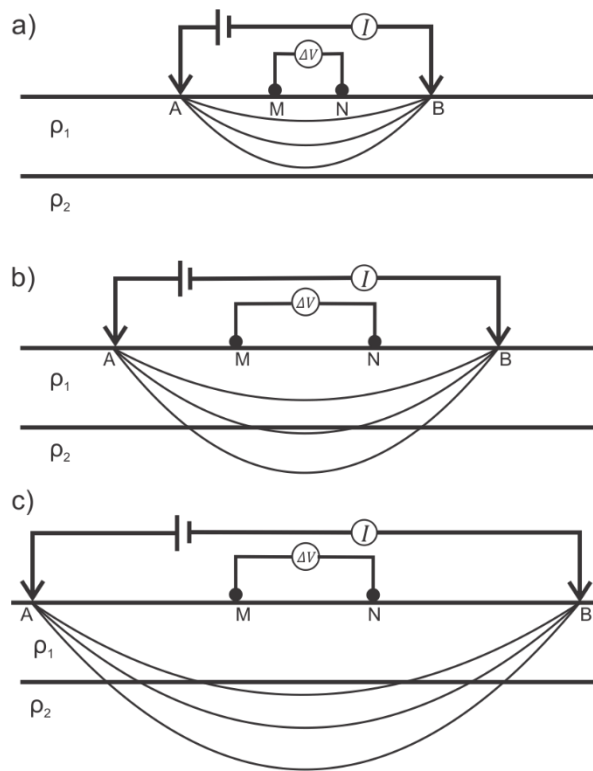


Figura 3.5. Mediciones de la resistividad aparente aumentando el espaciamento entre los electrodos de corriente (AB) para incrementar la profundidad de penetración de la corriente inyectada; siendo $c > b > a$, tanto en el espaciamento entre los electrodos AB como en profundidad. Los resultados son registrados en una curva de resistividades (Kirsch, *et al.*, 2009).

Sin embargo, en el arreglo Schlumberger conforme se va incrementando el espaciamento entre los electrodos de corriente (AB) el voltaje progresivamente comienza a ser muy pequeño para ser medido con precisión, por lo que se debe de aumentar el espaciamento entre los electrodos de potencial (MN) para mantener un potencial medible (Milsom, J. 2003; Kearey *et al.*, 2002, & Telford *et al.*, 1998); esta operación se denomina empalme y ha de realizarse de modo que las últimas lecturas con el MN pequeño se repitan con el nuevo valor de MN (Orellana, E., 1970). Este cambio en la posición de los electrodos de potencial (MN) se ve reflejado en la curva de resistividades aparentes, la cual se observa segmentada el número de veces que hayan sido movidos los electrodos de potencial (MN; Figura 3.6), que a diferencia de los otros arreglos electródicos esta curva es continua.

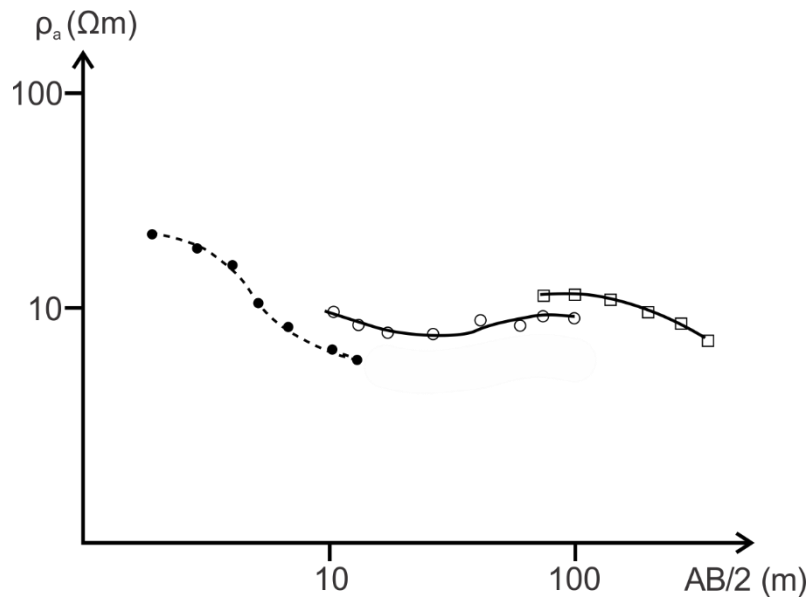


Figura 3.6. Curva de resistividades aparentes, obtenida a partir de un sondeo eléctrico vertical en el que se incrementó el espaciado entre los electrodos de potencial (Milsom, J., 2003).

Además, la información suministrada por un SEV aislado es, en general, pobre e insegura, por lo que los SEV suelen agruparse en perfiles más o menos rectilíneos. Relacionando los resultados de los SEV de un perfil, es posible establecer la existencia en el subsuelo de diferentes “capas geoelectricas”, que representan otros tantos estratos o formaciones geológicas cuya naturaleza puede deducirse de la resistividad de cada una, siempre que se disponga de información geológica suficiente (Orellana, E., 1970).

El procedimiento de sondeos eléctricos verticales, de acuerdo a Kirsch, R. (2009) se aplica en donde se cree que existen estratos horizontales o aproximadamente horizontales, que geológicamente se relacionan con rocas sedimentarias de diferentes litologías; acuíferos entre capas de diferentes propiedades de permeabilidad; rocas sedimentarias que cubren rocas ígneas o zonas de erosión de rocas ígneas.

3.2.4 Curvas de resistividades

Los valores de resistividad aparente obtenidos mediante un SEV sin importar la configuración electródica que se haya utilizado deben ser trazados en una gráfica bilogarítmica, conocida como curva de resistividades aparentes (Orellana, E.,1970); en donde el eje “x” representa la mitad de la separación entre los electrodos de corriente ($AB/2$) y el eje “y” representa la resistividad aparente (ρ_a) (Reynolds, J., 1998; Figura 3.6).

La importancia de las curvas de resistividades radica en que constituyen el elemento fundamental tanto en la etapa de interpretación cualitativa; así como también en el procesamiento de los datos de resistividad aparente. En la interpretación cualitativa estas ayudan a conocer de manera pronta la morfología de las curvas obtenidas en campo mediante el empleo de las denominadas curvas tipo (H, K; Q, A; Figura 3.7), las cuales están constituidas por tres capas eléctricas; sin embargo, sí se observa un número mayor de capas en las curvas obtenidas en campo lo que se debe de realizar es una combinación entre las curvas tipo (Reynolds, J., 1998), logrando conocer mediante este procedimiento el número de capas posibles que se encuentran en el subsuelo de la zona de estudio. Las curvas de resistividades obtenidas en campo para estar asociadas con humedad, necesariamente deben tener una correlación con curvas tipo H ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), lo cual indica que existe un contraste de resistividad menor entre la capa central y las que la encajonan. Las curvas de los SEVs también pueden ser HK ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$), QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) o alguna de las curvas que muestren una porción tipo H (López-Loera, 2014).

En la etapa de procesamiento, las curvas de resistividades constituyen la información de entrada que utilizan los softwares especializados para la modelación directa o la inversión de los datos de resistividad aparente, y de esta manera obtener la resistividad real, espesor y profundidad de cada una de las capas que componen el corte geoelectrico del subsuelo del punto investigado (Orellana, E., 1970).

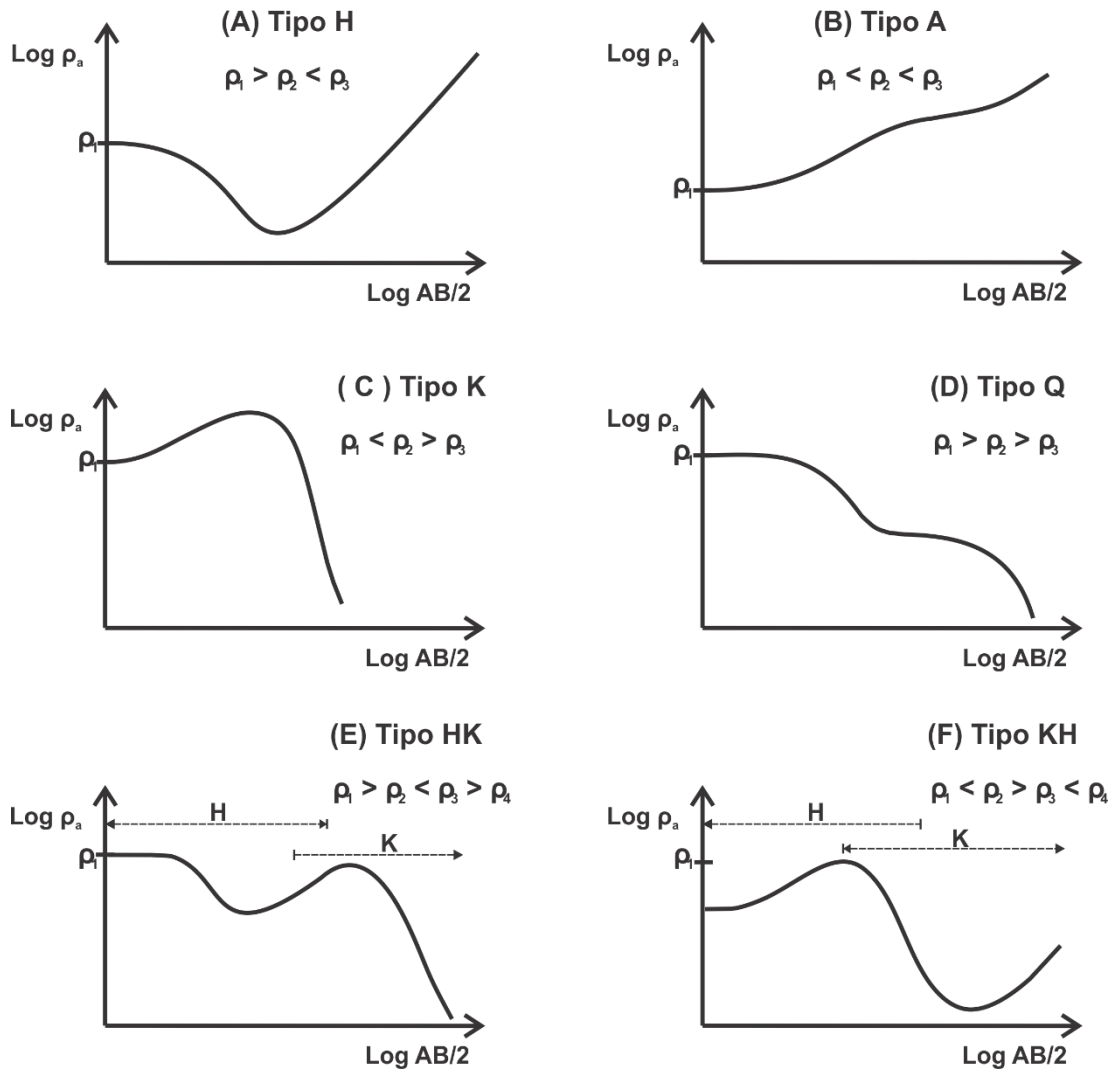


Figura 3.7. Curvas de resistividad aparente para diferentes estructuras de la resistividad: (A) a (D) son modelos de tres capas; (E) y (F) son modelos de cuatro capas.

Capítulo 4

METODOLOGÍA

Metodología

El desarrollo de este capítulo se conforma por dos apartados: trabajo en campo y trabajo en gabinete. En la sección trabajo en campo se menciona lo relacionado a la planificación y adquisición de los datos, tales como: el número de campañas llevadas cabo, la ubicación de los sondeos y la descripción del equipo utilizado para la toma de los datos. En el apartado de trabajo en gabinete se indica a grandes rasgos el procedimiento sistemático realizado para la obtención de las secciones geológicas en las comunidades objeto de estudio, a partir de los datos procesados obtenidos en las campañas geoelectricas; así como también los softwares empleados en el procesamiento, interpretación y visualización de la información. Sin omitir la investigación documental previa llevada a cabo para la recopilación de la información que sustenta el desarrollo de esta tesis.

4.1 Trabajo en campo

4.1.1 Planificación

En primer instancia para ubicar los sitios más adecuados de donde efectuar los sondeos eléctricos verticales, se llevó a cabo un recorrido previo por la zona de interés apoyado con cartografía geológica y topográfica del SGM y del INEGI, así como también se tomó en cuenta los antecedentes hidrogeológicos proporcionados por los beneficiarios respecto a las exploraciones anteriores, teniendo precaución en elegir los lugares que formarán parte de los límites de las localidades de San Juan Tepulco, San Jerónimo Ocotitlán y de la cabecera municipal de Acajete.

4.1.2 Adquisición de datos

El trabajo en campo consistió de dos campañas geoelectricas de resistividad, en las que se realizaron SEVs con el arreglo electrodico Schlumberger. La campaña 1 (C1) se efectuó en el transcurso de un día en la comunidad de San Juan Tepulco, con un total de 5 sondeos a mediados del mes de octubre de 2014, designándolos con la nomenclatura de SEV-(No.)T. La segunda campaña (C2) se llevó a cabo en San Jerónimo Ocotitlán, está también se efectuó durante el transcurso de un día, con un

número de 4 sondeos a inicios del mes de marzo de 2015, denotándolos con la nomenclatura de SEV-(No.)J.

Las coordenadas geográficas de los sondeos se tomaron con respecto a la ubicación del centro geométrico de cada sondeo. Estas se obtuvieron mediante el uso de un GPS de bolsillo de la marca GARMIN, con el datum WGS84 y con una aproximación de 4 metros (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Ubicación geográfica de los SEVs llevados a cabo en San Juan Tepulco y San Jerónimo Ocotitlán, Acajete.

Comunidad	SEV	UTM		Altitud (msnm)
		Este (x)	Norte (y)	
San Juan Tepulco	SEV-1T	609479	2112898	2 475
	SEV-2T	606992	2113851	2 560
	SEV-3T	608960	2114042	2 515
	SEV-4T	609167	2112320	2 459
	SEV-5T	610499	2111834	2 428
San Jerónimo Ocotitlán	SEV-1J	608947	2105128	2 300
	SEV-2J	608964	2105676	2 308
	SEV-3J	609451	2105316	2 305
	SEV-4J	608941	2103557	2 287

Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran la ubicación de los sondeos efectuados en San Juan Tepulco y en San Jerónimo Ocotitlán respectivamente. En el Anexo I, se muestra la ubicación a detalle de los nueve sondeos ejecutados en las dos campañas geoelectricas, así como también se añaden las fotografías de la ubicación de cada uno de ellos.

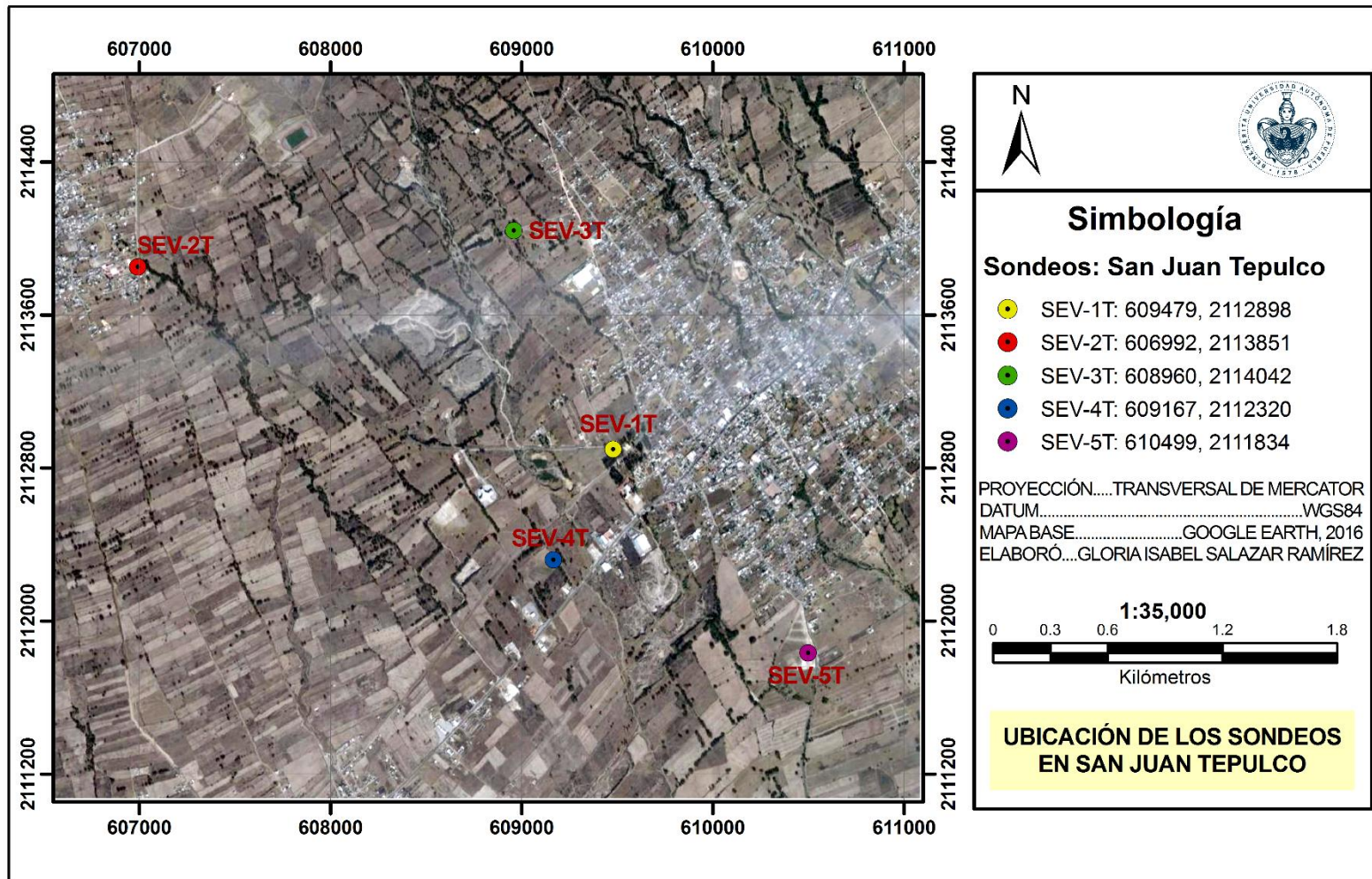


Figura 4.1. Ubicación de los sondeos llevados a cabo en la comunidad de San Juan Tepulco, los cuales están comprendidos en dicha comunidad, así como también en la cabecera municipal de Acajete.

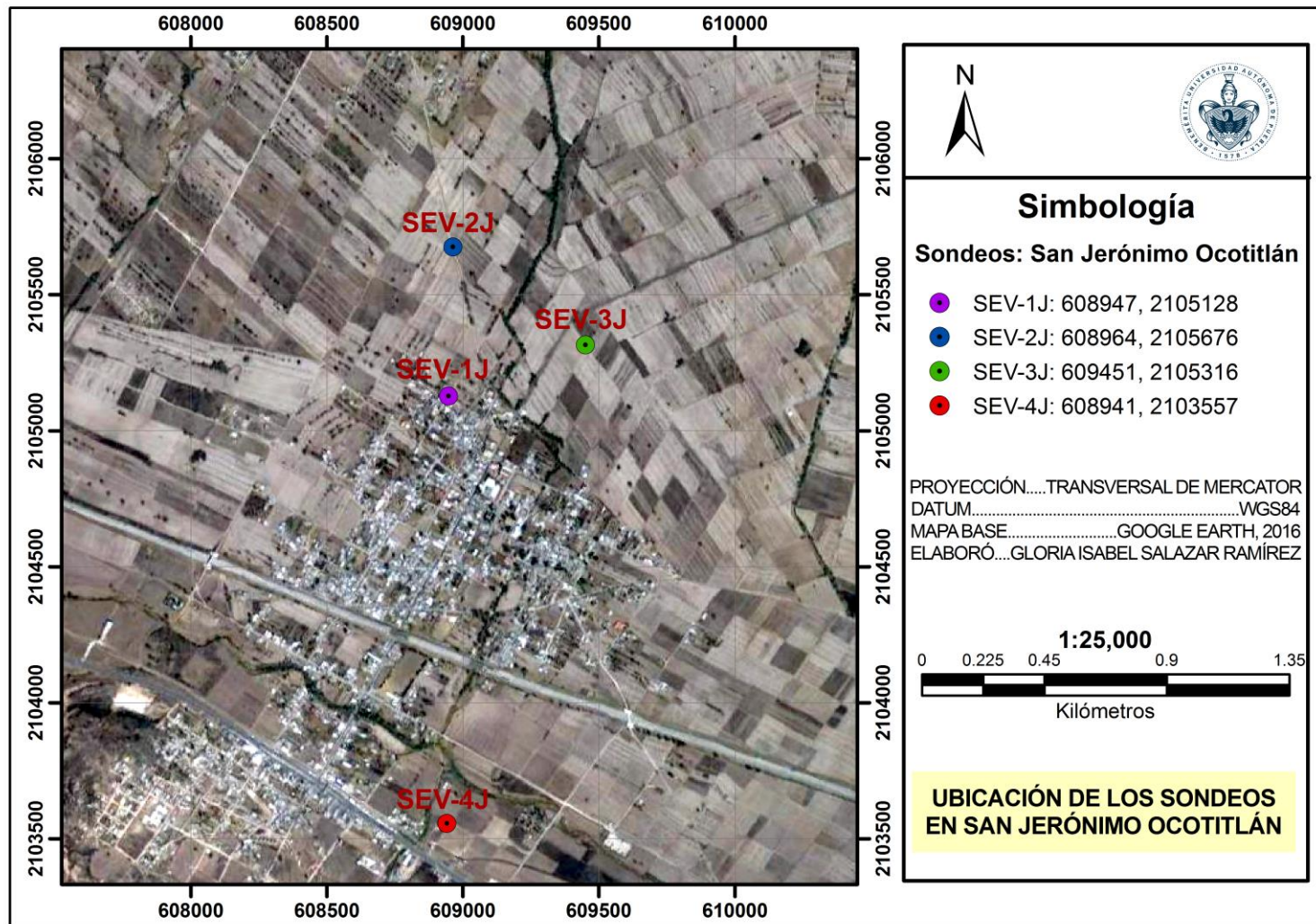


Figura 4.2. Ubicación de los sondeos llevados a cabo en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, los cuales están comprendidos en dicha comunidad.

La proximidad de la zona de estudio a la estructura volcánica de La Malinche influye en la disponibilidad del agua subterránea en las zonas circundantes, principalmente por la diferencia de altitudes así como también por la heterogeneidad en la distribución de los materiales y el bajo grado de consolidación de estos, permitiendo el paso del agua a niveles más inferiores del subsuelo; razones por las cuales se propuso que la profundidad de exploración fuera mayor a los 200 m y de este modo alcanzar los niveles de saturación de las aguas profundas. En consecuencia, las aberturas máximas de AB/2 en San Juan Tepulco fueron de 600 y 800 m, y para San Jerónimo Ocotitlán fueron de 400 m para los cuatro sondeos. La toma de lecturas para ambas campañas tuvieron una separación de $AB/2 = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600$ y 800 metros; obviamente que las lecturas de San Jerónimo Ocotitlán se quedaron hasta los 400 metros.

4.1.3 Equipo utilizado

De acuerdo a CONAGUA (2007) uno de los aspectos más importantes en la práctica de la exploración geoelectrica es la selección del equipo adecuado para un trabajo en específico. Para ello, propone una serie de parámetros necesarios a considerar al momento de la selección del equipo: profundidad de investigación requerida en el proyecto, características de la zona de estudio, resolución requerida, portabilidad, etc.

Además de los parámetros antes mencionados tanto CONAGUA como la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Puebla (CEASPUE) en sus Términos de Referencia establecen lineamientos técnicos en los componentes que debe presentar el equipo transmisor y receptor a utilizar. El circuito de emisión o transmisor debe ser capaz de introducir y hacer circular por el terreno una corriente eléctrica de intensidad constante, hasta de 10 amperes, utilizando un voltaje de salida entre 100 y 1200 volts y con una capacidad de lectura de hasta un miliamper. En el circuito de recepción o de potencial se debe emplear un instrumento de gran impedancia de entrada, mínimo de un megaohm, capaz de medir tensiones comprendidas desde fracciones de milivolts hasta rangos de 10 o más volts.



Figura 4.3. Equipo SCINTREX utilizado en la adquisición de los datos de resistividad aparente. De izquierda a derecha de la imagen se tiene el transmisor, el receptor y el motogenerador; así como los electrodos empleados.

Acatando los lineamientos técnicos de CONAGUA, del CEASPUE y de acuerdo a los objetivos de este trabajo de tesis, el equipo utilizado para la adquisición de los datos de resistividad consistió de un SCINTREX. Este se encuentra conformado por un transmisor modelo IPC-7 con una potencia máxima de 2.5 KW que emplea como fuente un motogenerador de combustión interna de 8 HP; el receptor es un modelo IPR-8, el cual obtiene la diferencia de potencial (Figura 4.3).

La Tabla 4.2 muestra las características del transmisor, receptor, así como de los accesorios y herramientas complementarios indispensables para la toma de datos en campo.

Tabla 4.2. Equipo, accesorios y herramientas complementarios empleados en el trabajo en campo.

Equipo	Especificaciones
Transmisor	- IPC-7 con una potencia máxima de 2.5 KW - Motogenerador de combustión interna de 8 HP
Receptor	IPR-8 con una impedancia de entrada de 3 MΩ
4 Carretes de cable	- 2 carretes para la abertura AB - 2 carretes para la abertura MN
8 Electrodo	- 4 electrodos de acero común - 4 electrodos no polarizables
4 Marros	De uso común
3 Radios	Motorola (fr50)
1 GPS	GARMIN
Carpeta	Formato de campo

4.2 Trabajo en gabinete

El trabajo en gabinete se encaminó en el tratamiento de vaciado e interpretación de los datos obtenidos en campo para conocer las unidades geológicas del área de estudio, así como determinar cuáles son susceptibles a contener agua. No obstante, para lograr esta interpretación es necesario llevar a cabo previamente un procedimiento sistemático con ayuda de softwares especializados, para proponer de este modo un modelo geológico del subsuelo, resultado del análisis de las resistividades y las evidencias geológicas de la zona de estudio.

En primer lugar, se realizó el procesamiento de los datos obtenidos en campo, para obtener de esta forma los espesores, profundidades y resistividades reales. En este caso se utilizó el software IPI2Win, Geoscan-M Ltd., de licencia libre; el cual está diseñado para la interpretación 1D de las curvas de los sondeos eléctricos verticales a lo largo de un perfil (Bobachev, 2002). Posteriormente, también con el software

IPI2Win se construyeron los perfiles a partir de la información obtenida de los modelos propuestos en cada sondeo, generando de esta forma las secciones geoeléctricas. Después se realizó el análisis de las resistividades y su distribución en las secciones, constituyendo esto la base para establecer una categorización de las resistividades y de este modo obtener las unidades geoeléctricas; las cuales permitieron obtener una mejor visualización de la información geoeléctrica, para ello se utilizó el software Surfer 11®, el cual interpola la información de la distribución de las resistividades, los espesores y profundidades de los diferentes sondeos que conforman al perfil. En base a las unidades geoeléctricas de las secciones, así como de la geología local de las zonas de interés se construyeron las secciones geológicas también con el software Surfer 11®.

Para ambas campañas, tanto las unidades geoeléctricas como las geológicas fueron las mismas con la finalidad de dar una mejor correlación entre la litología de ambas comunidades y de este modo dar solución a unos de los objetivos de este trabajo de tesis.

Capítulo 5

RESULTADOS

5 Resultados

5.1 Procesamiento

El procesamiento en este trabajo de tesis se realizó con el método de modelación directa con el software IPI2Win; el cual consiste en ajustar la curva teórica (línea roja) con la curva de campo (línea negra) considerado un porcentaje de error de ajuste pequeño entre dichas curvas, llevándose a cabo en cada uno de los nueve SEVs efectuados. Los valores de resistividad, espesor y profundidad del modelo propuesto deben estar en concordancia con la morfología de la curva de campo y la profundidad de exploración, así como también con la geología local. Además, los modelos propuestos para los diferentes sondeos de un mismo estudio deben ser parecidos; es decir, tener una cierta relación entre los valores de resistividad y espesor, permitiendo posteriormente una mejor correlación entre las capas geoelectricas. A continuación, se presenta el modelo que mejor se ajusta a la curva de campo del sondeo SEV-3J (Figura 5.1).

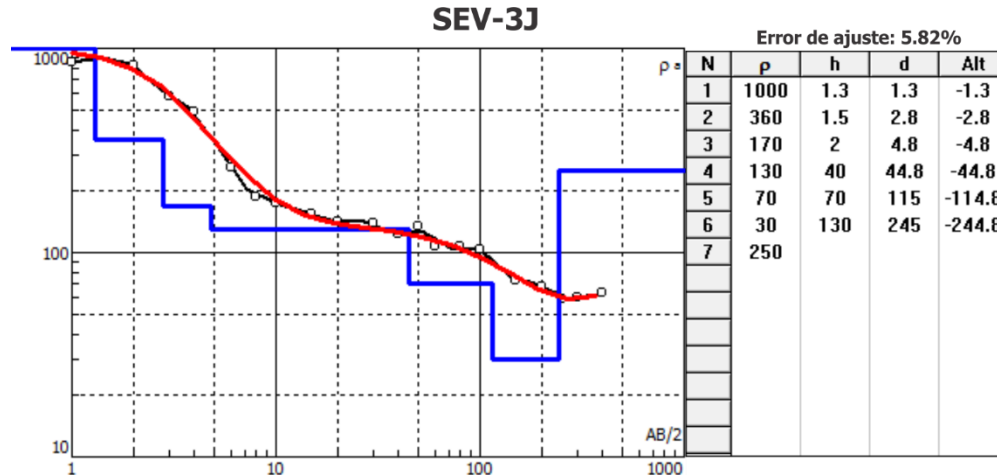


Figura 5.1. Modelo con mejor ajuste entre la curva teórica y la de campo para el sondeo SEV-3J.

El desarrollo de este primer paso del procedimiento tiene una gran importancia; ya que a partir de él se obtienen los valores de espesor, profundidad y resistividad reales. Asimismo, permite la construcción de los perfiles y con ello conocer los cortes geoelectricos mediante el uso del software IPI2Win.

5.2 Perfiles

En la campaña 1 (C1) se realizaron seis perfiles mientras que en la campaña 2 (C2) se efectuaron cuatro, los perfiles llevados a cabo en la comunidad de San Juan Tepulco presentan la nomenclatura de (No. de perfil)T y los de San Jerónimo Ocotitlán (No. de perfil)J (Figura 5.2 y Figura 5.3 respectivamente). En dichas figuras se observa que los perfiles III-III'T, IV-IV'T, V-V'T, VI-VI'T, II-II'J, III-III'J y el IV-IV'J están conformados por dos SEVs mientras que los perfiles I-I'T, II-II'T y el I-I'J los conforman tres sondeos. La construcción de los perfiles antes mencionados se realizó en base en que deben ser más o menos rectilíneos, aspecto en función del número y distribución de los sondeos ejecutados en un estudio, así como también del mayor número posible de sondeos que pueda comprender un perfil; sin embargo, debido a la cantidad baja de sondeos efectuados en cada campaña y a su distribución, constituyeron condicionantes para que los perfiles que se establecieron en este estudio no tuvieran un número mayor de dos sondeos para la mayoría de ellos, además se debe de tener en cuenta de que el número de sondeos en cada estudio dependió también de los recursos económicos del contratante. En la Tabla 5.1 se enlistan los perfiles que se construyeron en cada campaña.

Tabla 5.1. Nomenclatura de los perfiles realizados en ambas campañas.

	Campaña 1 (C1)	Campaña 2 (C2)
Perfiles	I-I'T II-II'T III-III'T IV-IV'T V-V'T VI-VI'T	I-I'J II-II'J III-III'J IV-IV'J

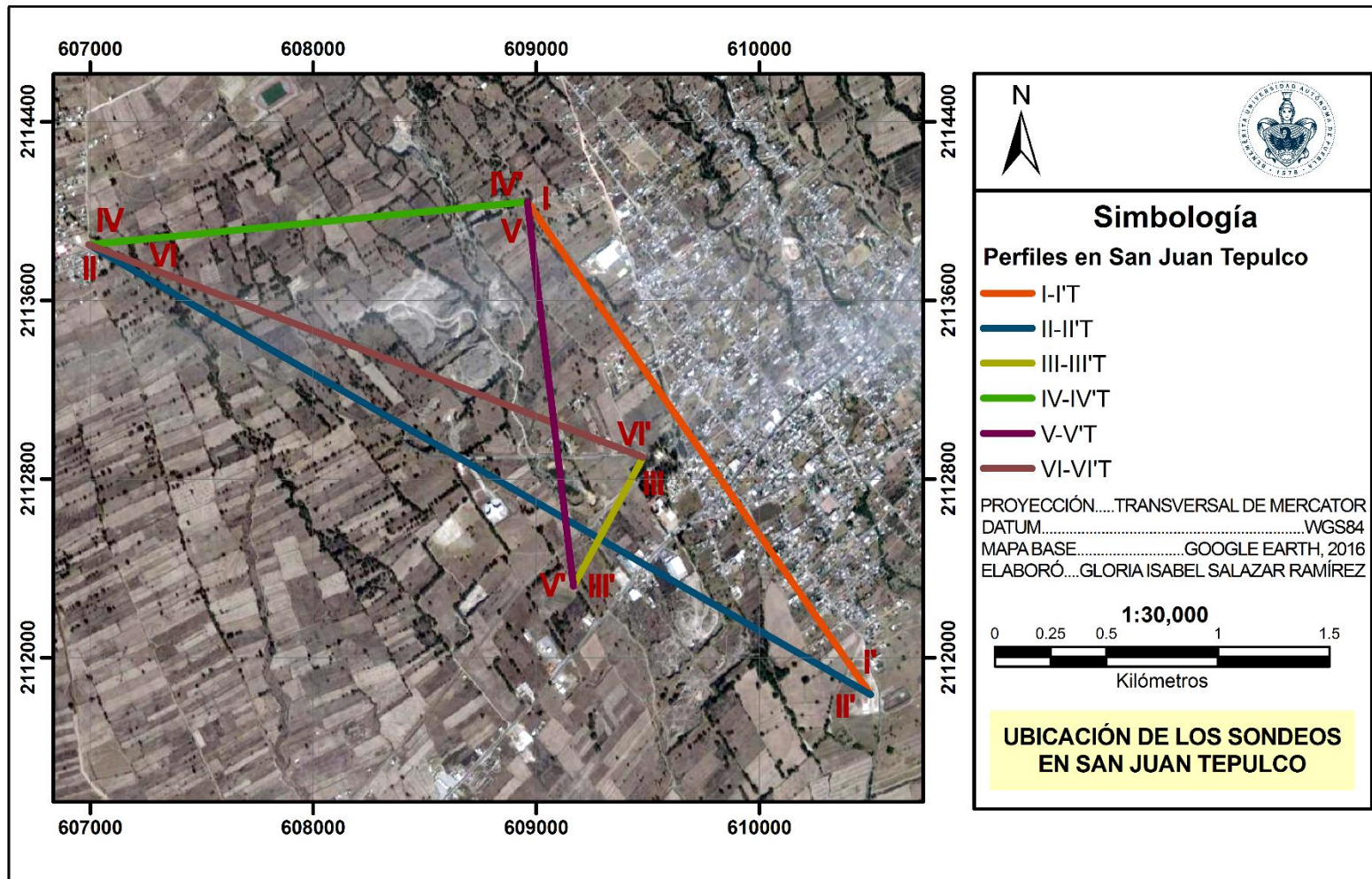


Figura 5.2. Distribución de los seis perfiles propuestos en San Juan Tepulco.

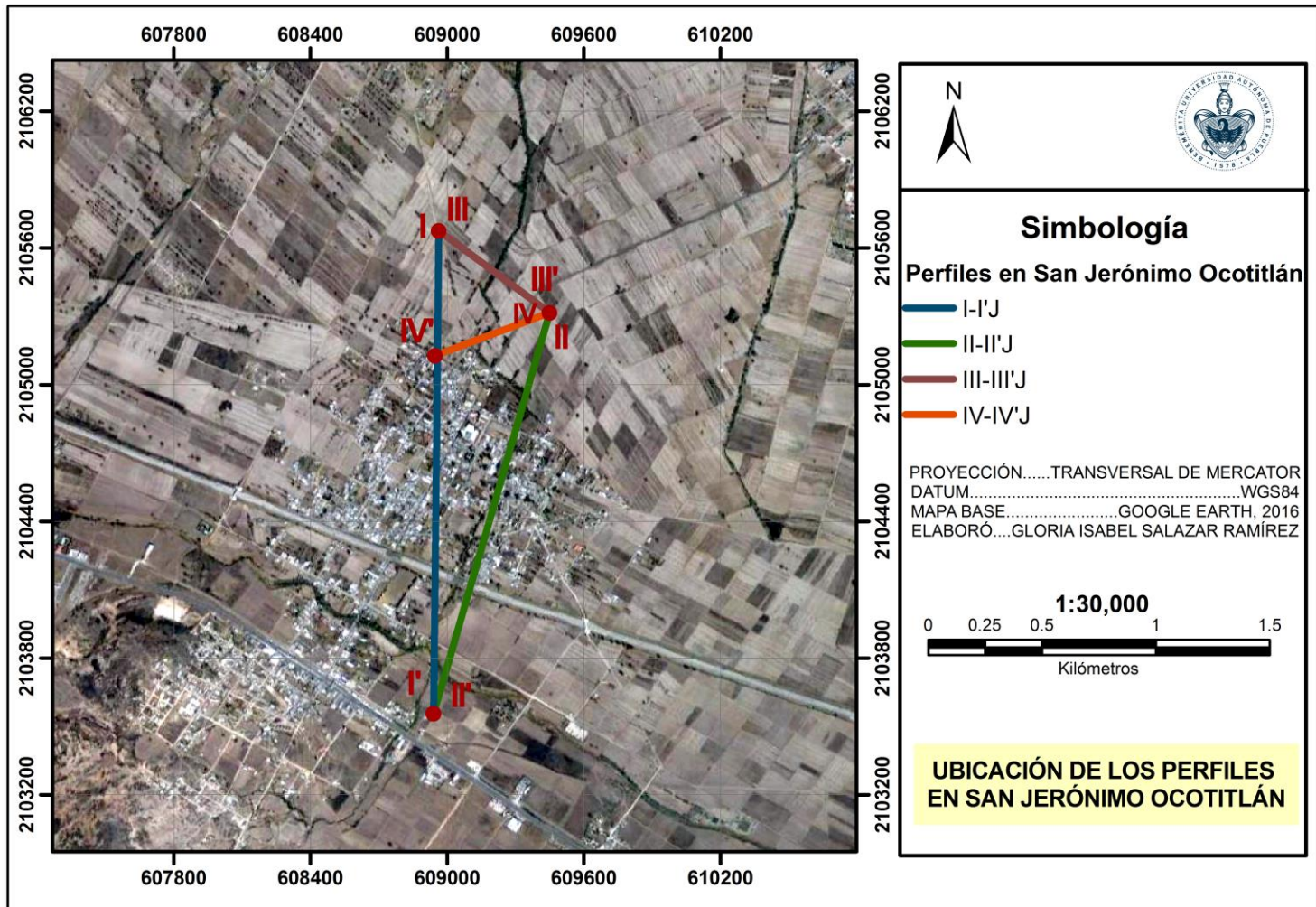


Figura 5.3. Distribución de los cuatro perfiles propuestos en San Jerónimo Ocotitlán.

5.3 Cortes geoelectricos

Los resultados de la interpretación de un perfil de SEV se suelen representar gráficamente en forma de “cortes geoelectricos” que son cortes o secciones que muestran la distribución de las resistividades en el subsuelo (Orellana, E., 1970). En esta parte se utilizó el software IPI2Win, el cual para realizar la representación gráfica de los cortes geoelectricos considera los modelos propuestos de cada uno de los sondeos, su altitud y la distancia existente de cada uno de los sondeos que conforman a un determinado perfil con respecto al primer sondeo de dicho perfil.

A continuación, se describen las características de las secciones de cada uno de los perfiles realizados en ambas campañas, tales como: sondeos que conforman al perfil, su dirección y longitud; así como también la profundidad, espesor y distribución de las resistividades de las diferentes capas eléctricas existentes en cada sección. La descripción de las características de las secciones se simplificó debido a que en cada campaña se establecieron como parámetros los valores mínimos y máximos de las resistividades, siendo de 2 200 Ωm y de 70 Ωm el máximo y el mínimo resistivo respectivamente para la campaña 1, mientras que en la campaña 2 el máximo resistivo es de 1 000 Ωm y el mínimo es de 15 Ωm ; obteniendo de esta forma la misma paleta de colores para las todas las secciones de una misma campaña.

5.3.1 Cortes geoelectricos de San Juan Tepulco

Sección del Perfil I-I'T

El Perfil I-I'T está conformado por los sondeos SEV-3T, SEV-1T y el SEV-5T con una altitud de 2 515, 2 475 y 2 428 metros respectivamente, notando una diferencia de altura de 40 m entre el SEV-3T y el SEV-1T y de 87 m entre el SEV-3T y el SEV-5T, motivo por el cual en la parte superior de los SEV-1T y SEV-5T de la sección se observa una zona en blanco. El perfil presenta una dirección NNW-SSE, una longitud total de 2 690 m, la profundidad de exploración en la parte inicial de la sección es de 381 m, en la parte central es de 312 m y en la parte final de esta misma es de 357 m. La parte inicial de la sección comprende una longitud de 605 m desde la posición del SEV-3T, la parte central abarca de 605 a 1 950 m y la parte final de la

sección va de 1 950 a 2 690 m que es donde se ubica el último sondeo del perfil (Figura 5.4).

En la parte inicial de la sección se observa que las primeras tres capas presentan valores de resistividad de 630, 300 y 650 Ωm con espesores de 1, 1, y 4 m respectivamente. Posteriormente, se presenta una resistividad de 850 Ωm con un espesor de 10 m y a una profundidad de 6 m, seguido de un valor de 540 Ωm con un espesor de 15 m y a una profundidad de 16 m. Subyaciendo a las capas antes descritas se observa una resistividad de 270 Ωm con un espesor de 40 m y a una profundidad de 31 m, seguido de una capa con un valor de 740 Ωm con un espesor de 130 m y a una profundidad de 71 m, luego se encuentra un valor de 330 Ωm con un espesor de 180 m y a una profundidad de 201 m, la última capa explorada es a una profundidad de 381 m con una resistividad de 150 Ωm .

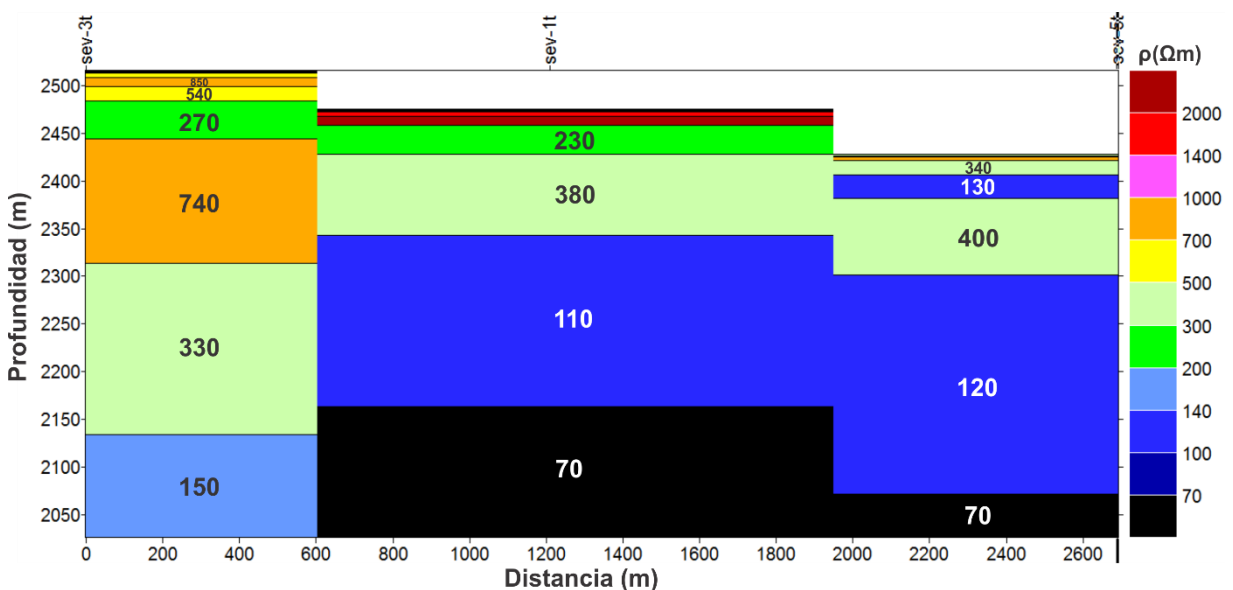


Figura 5.4. Sección geoelectrica del Perfil I-I'.

En la parte central de la sección las primeras dos capas tienen espesores menores de un metro siendo de 0.6 y 0.8 m con resistividades de 850 y 2 100 Ωm respectivamente, le sigue un valor de 500 Ωm con un espesor de 1.5 m. Posteriormente, se encuentran dos capas con los valores de resistividades más altas de toda la sección siendo de 1 650 y 2 200 Ωm con espesores de 4 y 10 m respectivamente. A una profundidad de

17 m se presenta una capa de 230 Ω m con un espesor de 30 m, le sigue un valor de 380 Ω m con un espesor de 85 m y a una profundidad de 47 m. Las últimas dos capas exploradas tienen resistividades menores en comparación con esta parte de la sección, siendo de 110 Ω m con un espesor de 180 m y a una profundidad de 132 m y de 70 Ω m a una profundidad de 312 m.

En la parte final de la sección las primeras dos capas tienen un espesor de 1.5 m y una resistividad de 440 y 700 Ω m respectivamente, le sigue una capa con un valor de 820 Ω m con un espesor de 3 m. Posteriormente, se presenta una capa de 340 Ω m con un espesor de 15 m y a una profundidad de 6 m, debajo de esta capa se presenta un valor de 130 Ω m con un espesor de 25 m y a una profundidad de 21 m, en seguida se observa una resistividad de 400 Ω m con un espesor de 80 m y a una profundidad de 46 m, continua una capa de 120 Ω m con espesor de 230 m y a una profundidad de 126 m, subyaciendo a todas las capas antes mencionadas se presenta una resistividad de 70 Ω m a una profundidad de 357 m.

Sección del Perfil II-II'T

El Perfil II-II'T está conformado por los sondeos SEV-2T, SEV-4T y el SEV-5T con una altitud de 2 560, 2 459 y 2 428 metros respectivamente, notando un cambio marcado de menor altitud de 101 m en el SEV-4T y de 132 m en el SEV-5T con respecto al primer sondeo del perfil (SEV-2T), obteniendo en la parte superior de la sección en donde se encuentran los SEV-4T y el SEV-5T una región en blanco; ya que el sondeo SEV-2T forma parte de la ladera inferior de La Malinche y por tanto posee una altitud mayor con respecto a los otros dos sondeos que se localizan en zonas un poco más alejadas de la ladera del volcán y por ende con menores altitudes. La dirección del perfil es NW-SE, la distancia entre el SEV-2T y el SEV-4T es de 2 640 m y la distancia entre el SEV-4T y el SEV-5T es de 1 460 m, tendiendo una longitud total de 4 100 m. La profundidad de exploración en la parte inicial de la sección es de 479 m, en la parte central es de 378 m y en la parte final de esta misma es de 357 m. La parte inicial de la sección comprende una longitud de 1 320 m desde la posición del SEV-2T, la parte central abarca de 1 320 a 3 370 m y la parte final de la sección va de 3 370 a 4 100 m que es donde se ubica el último sondeo del perfil (Figura 5.5).

En la Figura 5.5 se observa que en la parte inicial del modelo la primer capa explorada tiene una valor de resistividad de 620 Ωm con un espesor de 1 m, luego se presenta un valor de 1 400 Ωm con un espesor de 1 m, le sigue una capa con un valor de 540 Ωm y con 2 m de espesor, posteriormente se presenta una resistividad de 470 Ωm con un espesor de 3. A una profundidad de 7 m se encuentra un valor de 800 Ωm con un espesor de 12 m, le sigue una capa con una resistividad de 370 Ωm con un espesor de 50 m y a una profundidad de 19 m, en seguida se presenta una valor de 680 Ωm con un espesor de 115 m y a una profundidad de 69 m, luego se presenta un valor de 300 Ωm con un espesor de 295 m y a una profundidad de 184 m, la última capa explorada tiene un valor de 110 Ωm y se encuentra una profundidad de 479 m.

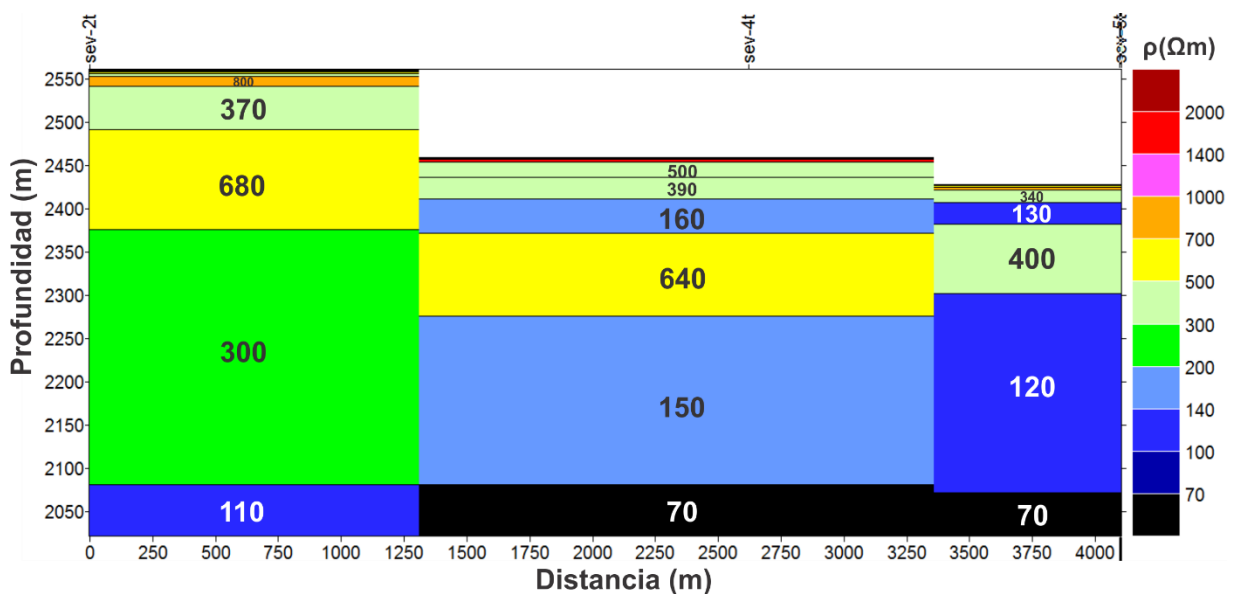


Figura 5.5. Sección geoelectrica del Perfil II-II'T.

En la parte central de la sección la primera capa tiene una resistividad de 1 350 Ωm , la siguiente capa presenta un valor de 630 Ωm y ambas capas poseen 1 m de espesor, la tercera capa presenta la resistividad más alta de la sección que es de 1 450 Ωm con un espesor de 3 m, le sigue un valor de 500 Ωm con un espesor de 18 m. A una profundidad de 23 m se encuentra una resistividad de 390 Ωm con un espesor de 25 m. Subyaciendo a las capas antes descritas se haya un valor de 160 Ωm con un espesor de 40 m y a una profundidad de 48 m, le continua una capa de 640 Ωm con

un espesor de 95 m y a una profundidad de 88 m, luego se observa una resistividad de 150 Ωm con un espesor de 195 m y a una profundidad de 183 m, la última capa tiene un valor de 70 Ωm a una profundidad de 378 m.

En la parte final de la sección las primeras dos capas tienen un espesor de 1.5 m y una resistividad de 440 y 700 Ωm respectivamente, le sigue una capa con un valor de 820 Ωm con un espesor de 3 m. Posteriormente, se presenta una capa de 340 Ωm con un espesor de 15 m y a una profundidad de 6 m, debajo de esta capa se presenta un valor de 130 Ωm con un espesor de 25 m y a una profundidad de 21 m, en seguida se presenta una resistividad de 400 Ωm con un espesor de 80 m y a una profundidad de 46 m. Subyaciendo a las capas antes descritas se encuentra un valor de 120 Ωm con un espesor de 230 m y a una profundidad de 126 m, la última capa tiene una resistividad de 70 Ωm a una profundidad de 357 m.

Sección del Perfil III-III'T

El Perfil III-III'T está conformado por los sondeos SEV-1T y el SEV-4T con una altitud de 2 475 y 2 459 metros respectivamente, observando una diferencia de altitud de 16 m entre ambos sondeos; presenta una dirección NE-SW y posee una longitud total de 660 m. La profundidad de exploración en la parte inicial de la sección es de 312 m y en la parte final de esta misma es de 378 m. La parte inicial de la sección tiene una longitud de 330 m desde la posición del primer sondeo que es el SEV-1T y la parte final de la sección comprende de 330 a 660 m que es en donde se ubica el segundo sondeo del perfil (Figura 5.6).

En la Figura 5.6 se observa que la primera capa explorada de la parte inicial de la sección tiene un valor de 850 Ωm con un espesor de 0.6 m, seguida de una resistividad de 2 100 Ωm con un espesor de 0.8 m, luego se presenta un valor de 500 Ωm con un espesor de 1.5 m. Posteriormente, se encuentran dos capas con resistividades altas en comparación a toda la sección, siendo de 1 650 y de 2 200 Ωm con espesores de 4 y 10 m respectivamente. A una profundidad de 17 m se presenta un valor de 230 Ωm con un espesor de 30 m, luego se tiene una resistividad de 380 Ωm con un espesor de 85 m y a una profundidad de 47 m, en seguida se presenta un valor de 110 Ωm con

un espesor de 180 m y a una profundidad de 132 m, la última capa explorada se encuentra a una profundidad de 312 m con una resistividad de 70 Ωm .

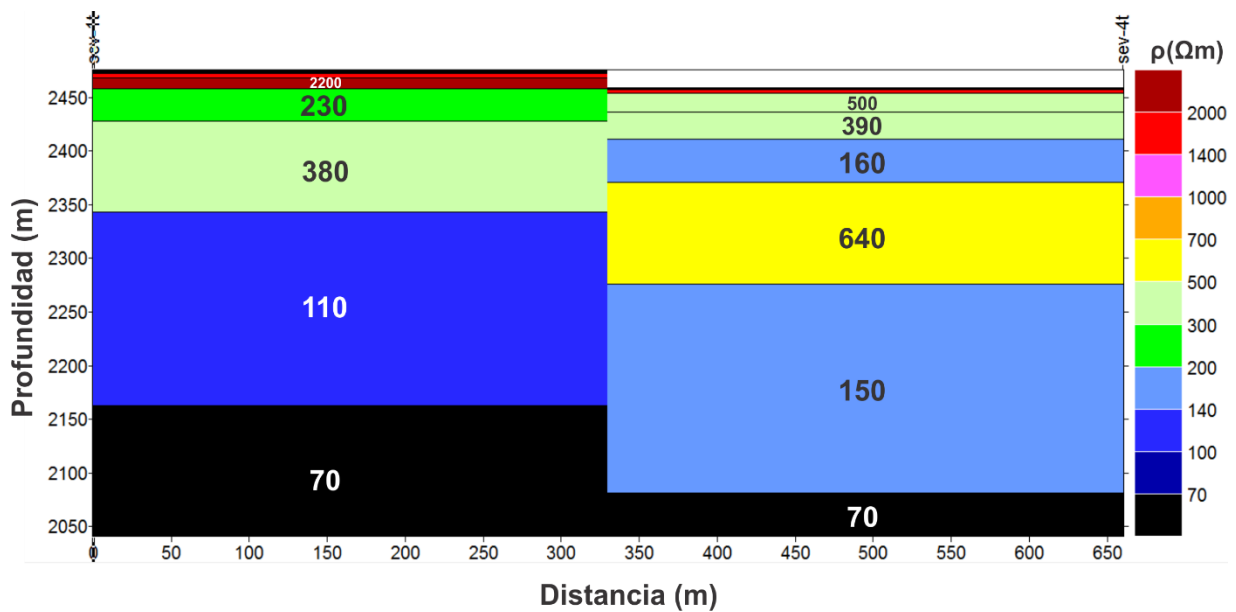


Figura 5.6. Sección geoelectrica del Perfil III-III'T.

Por otra parte, en la parte final de la sección las primeras capas exploradas presentan los valores de resistividad más altos con respecto a las capas subyacentes, siendo de 1 350 y 1 450 Ωm con espesores de 1 y 3 m respectivamente, no obstante estos valores son interrumpidos por un valor de 630 Ωm con 1 m de espesor. Posteriormente, se presenta una resistividad de 500 Ωm con un espesor de 18 m y a una profundidad de 5 m, le sigue un valor de 390 Ωm con un espesor de 25 m y a una profundidad de 23 m, luego se encuentra un capa de 160 Ωm con un espesor de 40 m y a una profundidad de 48 m, continua una capa de 640 Ωm con un espesor de 95 m y a una profundidad de 88 m, en seguida se presenta una resistividad de 150 Ωm con un espesor de 195 m y a una profundidad de 183 m, la última capa explorada tiene un valor de 70 Ωm a una profundidad de 378 m.

Sección del Perfil IV-IV'T

El Perfil IV-IV'T lo constituyen los sondeos SEV-2T y el SEV-3T con una altitud de 2 560 y 2 515 metros respectivamente, notando una diferencia de altitud de 45 m desde la parte inicial hasta la parte final de la sección; la dirección del perfil es casi W-E y presenta una longitud total de 1 980 m. La profundidad explorada en la parte inicial de la sección es de 479 m, mientras que en la parte final de la sección es de 381 m. La parte inicial de la sección comprende los primeros 990 m y la parte final de la sección va de 990 a 1 980 m (Figura 5.7).

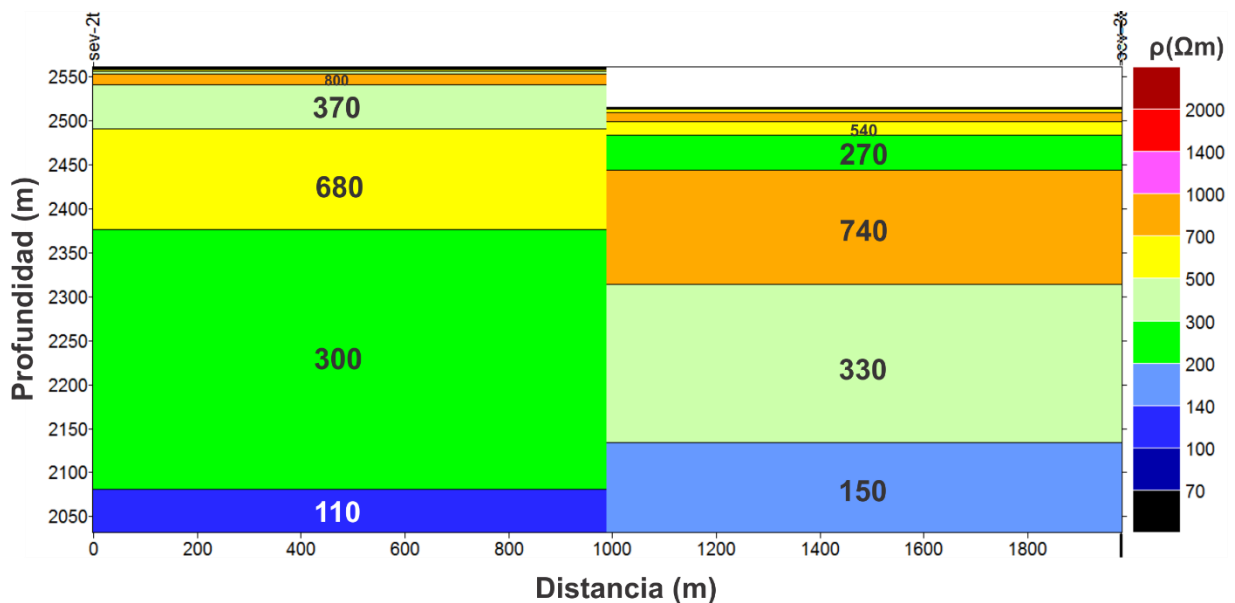


Figura 5.7. Sección geoelectrica del perfil IV-IV'T.

En la parte superior de la parte inicial de la sección se observa un valor de 620 Ωm con espesor de 1 m, seguido de una capa de 1 400 Ωm con 1 m de espesor, luego se presenta un valor de 540 Ωm con un espesor de 2 m, continua una resistividad de 470 Ωm con un espesor de 3 m. A una profundidad de 7 m se tiene un valor de 800 Ωm con un espesor de 12 m, continua una capa con una resistividad de 370 Ωm con un espesor de 50 m y a una profundidad de 19 m, luego se encuentra un valor de 680 Ωm con un espesor de 115 m y a una profundidad de 69 m, en seguida se tiene una resistividad de 300 Ωm con un espesor de 295 m y a una profundidad de 184 m,

subyaciendo a todas las capas antes mencionadas se presenta el menor valor de resistividad de la sección, siendo de 110 Ωm a una profundidad de 479 m.

En la parte final de la sección la primera y tercera capa presentan resistividades muy parecidas, siendo de 630 y 650 Ωm con espesores de 1 y 4 m respectivamente, las cuales se encuentran separadas por un valor de 300 Ωm con un espesor de 1 m. La cuarta capa tiene una resistividad de 850 Ωm con un espesor de 10 m y a una profundidad de 6 m, continua una capa de 540 Ωm con un espesor de 15 m y a una profundidad de 16 m, luego se presenta un valor de 270 Ωm con un espesor de 40 m y a una profundidad de 31 m. Posteriormente, se observa una resistividad de 740 Ωm con 130 m de espesor y a una profundidad de 71 m, le sigue una capa de 330 Ωm con un espesor de 180 m y a una profundidad de 201 m, subyaciendo a todas las capas antes mencionadas se encuentra la resistividad más baja de esta parte de la sección, con un valor de 150 Ωm a una profundidad de 381 m.

Sección del V-V'T

El Perfil V-V'T lo constituyen los sondeos SEV-3T y el SEV-4T con una altitud de 2 515 y 2 459 metros respectivamente, notando una diferencia de altitud de 56 m entre la parte inicial y final de la sección; la dirección del perfil es casi N-S y posee una longitud total de 1 740 metros. La profundidad de exploración en la parte inicial de la sección es de 381 m y en la parte final es de 378 m. La parte inicial de la sección geoelectrica comprende desde la posición del SEV-3T hasta los primeros 870 m, mientras que la parte final va de 870 a 1 740 m, punto en donde se ubica el SEV-4T.

A partir de la Figura 5.8 se observa que en la parte inicial de la sección la primera capa explorada tiene un valor de 630 Ωm , seguida de una resistividad de 300 Ωm , ambas con un 1 m de espesor, continua una capa de 650 Ωm con un espesor de 4 m, luego se presenta un valor de 850 Ωm con 10 m de espesor. Posteriormente, se encuentra una resistividad de 540 Ωm con un espesor de 15 m y a una profundidad de 16 m, en seguida se observa un valor de 270 Ωm con 40 m de espesor y a una profundidad de 31 m, continua una capa con una resistividad de 740 Ωm con 130 m de espesor y a una profundidad de 71 m, luego se presenta un valor de 330 Ωm con un espesor de

180 m y a una profundidad de 201 m, y subyaciendo a todas las capas antes mencionadas se encuentra un valor de 150 Ωm a una profundidad de 381 m.

En la parte final de la sección sobreyaciendo a todas las capas exploradas se tiene una resistividad de 1 350 Ωm con 1 m de espesor, seguida de un valor de 630 Ωm con un espesor de 1 m, en seguida se presenta la capa con la mayor resistividad de la sección que es de 1 450 Ωm y con un espesor de 3 m. Posteriormente, a una profundidad de 5 m se encuentra una resistividad de 500 Ωm con 18 m de espesor, le sigue un valor de 390 Ωm con un espesor de 25 m y a una profundidad de 23 m, continua una capa de 160 Ωm con 40 m de espesor y a una profundidad 48 m, luego se observa un valor de 640 Ωm con un espesor de 95 m y a una profundidad de 88 m, la penúltima capa explorada tiene una resistividad de 150 Ωm con 195 m de espesor y a una profundidad de 183 m y la última capa presenta un valor de 70 Ωm a una profundidad de 378 m.

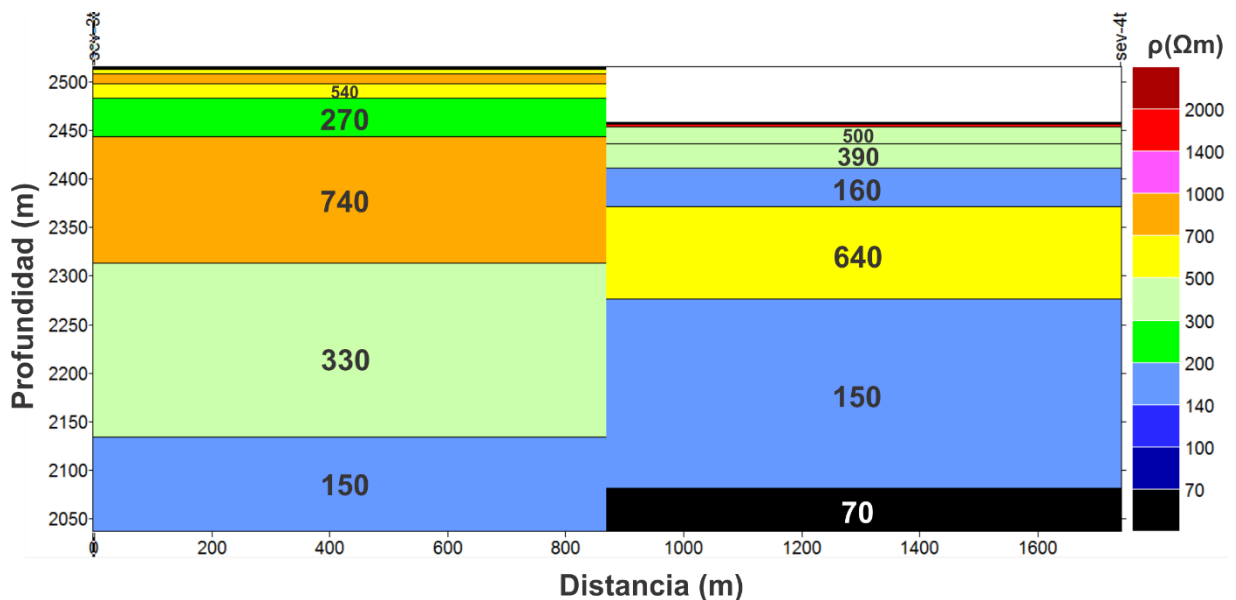


Figura 5.8. Sección geoelectrica del Perfil V-V'T.

Sección del Perfil VI-VI'T

El Perfil VI-VI'T lo constituyen los sondeos SEV-2T y el SEV-1T con una altitud de 2 560 y 2 475 metros respectivamente, notando que la diferencia de altitud entre la

parte inicial y final de la sección es de 85 m; la dirección del perfil es NW-SE y presenta una longitud total de 2 670 metros. La profundidad de exploración alcanzada en el inicio de la sección es de 479 m, mientras que en el final de la sección es de 312 m. La parte inicial de la sección geoelectrica comprende una longitud de 1 335 m a partir de la ubicación del SEV-2T, en tanto que la parte final de la sección va de 1 335 a 2 670 m, punto en donde se encuentra el SEV-1T (Figura 5.9).

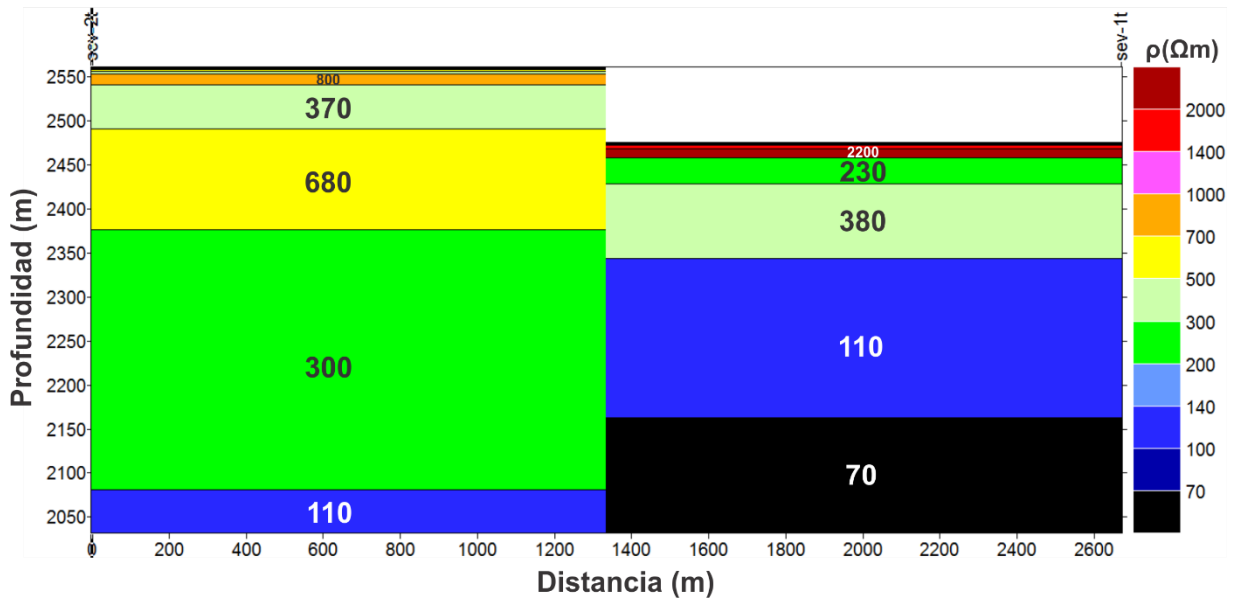


Figura 5.9. Sección geoelectrica del Perfil VI-VI'T.

En la parte inicial de la sección la capa que se encuentra sobreyaciendo a todas las demás tiene un valor de 620 Ωm, seguida de una resistividad de 1 400 Ωm ambas con 1 m de espesor, continua un valor de 540 Ωm con un espesor de 2 m, luego se presenta una resistividad de 470 Ωm con un espesor 3 m, le sigue una capa de 800 Ωm con un espesor de 12 m. A una profundidad de 19 m se observa una resistividad de 370 Ωm con un espesor de 50 m, en seguida se encuentra un valor de 680 Ωm con 115 m de espesor y a una profundidad de 69 m, luego se halla una capa de 300 Ωm con 295 m de espesor y a una profundidad de 184 m, la última capa explorada tiene un valor de 110 Ωm a una profundidad de 479 m.

Por otra parte, en la parte final de la sección las primeras capas exploradas tienen espesores de 0.6 y 0.8 m con resistividades de 850 y 2 100 Ωm respectivamente,

continua una capa de 500 Ωm con un espesor de 1.5 m, las siguientes dos capas presentan las resistividades más altas de la sección, siendo de 1 650 y 2 200 Ωm con 4 y 10 m de espesor respectivamente. A una profundidad de 17 m se encuentra un valor de 230 Ωm con un espesor de 30 m, continua una capa de 380 Ωm con 85 m de espesor y a una profundidad de 47 m, luego se observa un valor de 110 Ωm con un espesor de 180 m y a una profundidad de 132 m, la última capa explorada posee una resistividad de 70 Ωm a una profundidad de 312 m.

5.3.2 Cortes geoelectricos de San Jerónimo Ocotitlán

Sección del Perfil I-I'J

El Perfil I-I'J lo constituyen los sondeos SEV-2J, SEV-1J y el SEV-4J con una altitud de 2 308, 2 300 y 2 287 metros respectivamente, observando que la diferencia de altitud entre el valor máximo y mínimo es de 21 m para los sondeos que integran al perfil; la dirección de perfil es N-S y posee una longitud total de 2 120 metros. La profundidad explorada en la parte inicial de la sección es de 254 m, en la parte central es de 242 m y en la parte final de la sección es de 243 m. La parte inicial de la sección abarca los primeros 275 m, la parte central va de 275 a 1 335 m y la parte final de la sección comprende de 1 335 a 2 120 m (Figura 5.10).

En la parte inicial de la sección la capa que sobreyace a las demás tiene una resistividad de 370 Ωm , seguida de un valor de 100 Ωm ambas con 1 m de espesor, la siguiente capa tiene una resistividad de 270 Ωm con un espesor de 4 m, luego se presenta un valor de 110 Ωm con un espesor de 8 m. A una profundidad de 14 m se presenta un valor de 180 Ωm con 20 m de espesor, continua una capa de 140 Ωm con un espesor de 50 m y a una profundidad de 34 m, luego se observa la resistividad más baja de esta parte de la sección siendo de 40 Ωm con un espesor de 170 m y a una profundidad de 84 m y la última capa explorada tiene un valor de 100 Ωm a una profundidad de 254 m.

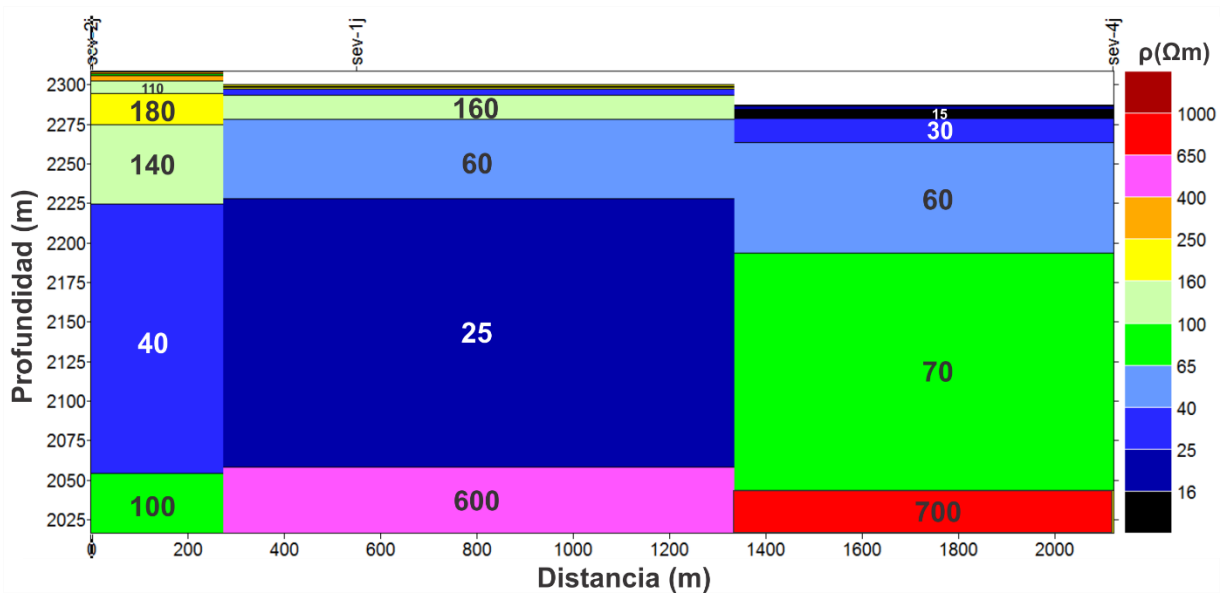


Figura 5.10. Sección geoelectrica del Perfil I-I'J.

En la parte central de la sección las primeras capas presentan una resistividad de 250, 100 y 220 Ωm con espesores de 0.8, 1 y 1 m respectivamente, luego se encuentra una capa con un valor de 35 Ωm con 4 m de espesor. Posteriormente, se observa un valor de 160 Ωm con un espesor de 15 m y a una profundidad de 7 m, en seguida se presenta una resistividad de 60 Ωm con un espesor de 50 m y a una profundidad de 22 m, continua una resistividad de 25 Ωm que es la más baja de esta parte de la sección con un espesor de 170 m y a una profundidad de 72 m, y la capa que subyace a las antes descritas tiene un valor de 600 Ωm a una profundidad de 242 m, la cual constituye la resistividad más alta de la sección.

En la parte final de la sección la mayoría de las capas presentan resistividades bajas en comparación a las otras partes de la sección, la primera capa explorada tiene un valor de 180 Ωm con un espesor de 0.4 m, continúan resistividades de 20, 15, 30 y 60 Ωm con espesores de 2, 6, 15 y 70 m respectivamente. A una profundidad de 93 m se encuentra un valor de 70 Ωm con un espesor de 150 m, la última capa explorada posee una resistividad de 700 Ωm a una profundidad de 243 m.

Sección del Perfil II-II'J

El Perfil II-II'J lo constituyen los sondeos SEV-3J y el SEV-4J con una altitud de 2 305 y 2 287 metros respectivamente, en este caso la diferencia de altitud entre los sondeos es de 18 m; la dirección de perfil es NE-SW y presenta una longitud total de 1 830 m. La profundidad explorada en la parte inicial de la sección geoelectrica es de 245 m, mientras que en la parte final de la sección es de 243 m. La parte inicial de la sección comprende los primeros 915 m a partir de la ubicación del SEV-3J, en tanto que la parte final de la sección va de 915 a 1 830 m.

A partir de la Figura 5.11 se observa que en la parte inicial de la sección la primera capa posee una resistividad de 1 000 Ωm siendo el valor más alto tanto de la sección como de la campaña 2 con un espesor de 1 m, seguido de un valor de 360 Ωm con espesor de 1.5 m, continua una capa de 170 Ωm con 2 m de espesor, luego se halla una resistividad de 130 Ωm con un espesor de 40 m. A una profundidad de 45 m se presenta un valor de 80 Ωm con espesor de 70 m, en seguida se observa una capa de 25 Ωm con 130 m de espesor y a una profundidad de 115 m, la última capa explorada tiene una resistividad de 600 Ωm y se encuentra a una profundidad de 245 m.

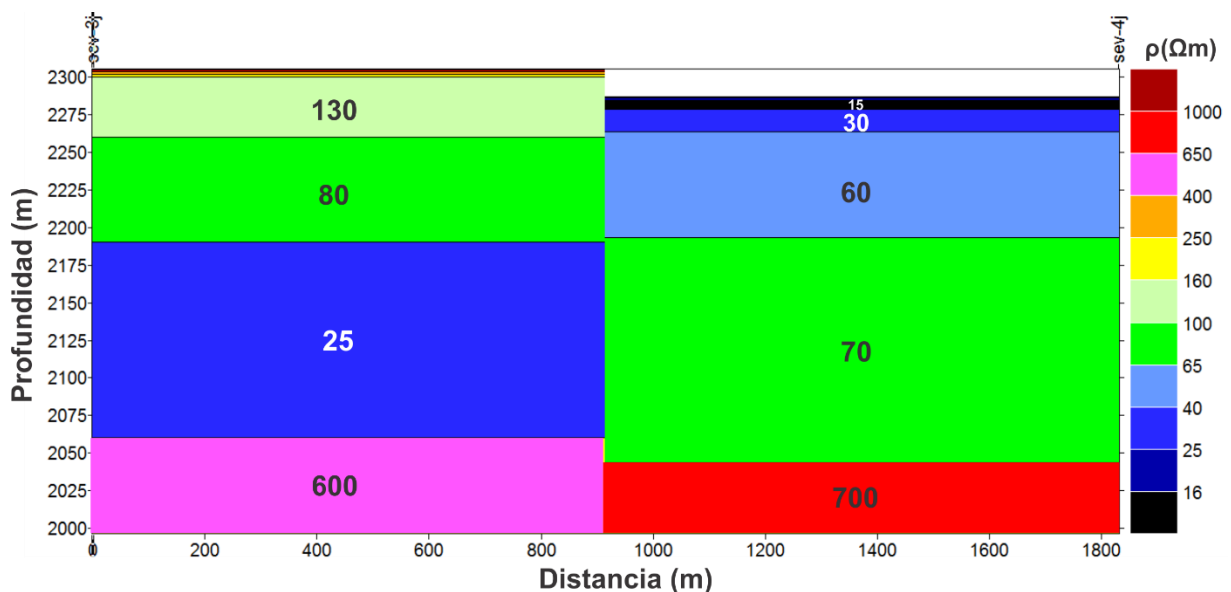


Figura 5.11. Sección geoelectrica del Perfil II-II'J.

En la parte final de la sección la capa que sobreyace a todas las demás tiene un valor de $180 \Omega\text{m}$ con un espesor de 0.4 m , luego se observa una capa de $20 \Omega\text{m}$ con un espesor de 2 m , en seguida se encuentra un valor de $15 \Omega\text{m}$ con un espesor de 6 m . A una profundidad de 8 m se observa un valor de $30 \Omega\text{m}$ con un espesor de 15 m , continua una resistividad de $60 \Omega\text{m}$ con un espesor de 70 m y a una profundidad de 23 m , le sigue una capa de $70 \Omega\text{m}$ con un espesor de 150 m y a una profundidad de 93 m , la última capa explorada se encuentra a una profundidad de 243 m con un valor de $700 \Omega\text{m}$.

Sección del Perfil III-III'J

El Perfil III-III'J lo constituyen los sondeos SEV-2J y el SEV-3J con una altitud de $2\ 308$ y $2\ 305$ metros respectivamente, observando que la diferencia de altitud entre el inicio y el final de la sección es de 3 m ; la dirección de perfil es NW-SE y posee una longitud total de 610 metros. La profundidad explorada en la parte inicial de la sección geoelectrica es de 254 m , mientras que en la parte final es de 245 m . A partir del punto en donde se ubica el SEV-2J hasta los primeros 305 m constituyen la parte inicial de la sección, en tanto que la parte final de la sección va de 305 a 610 m (Figura 5.12).

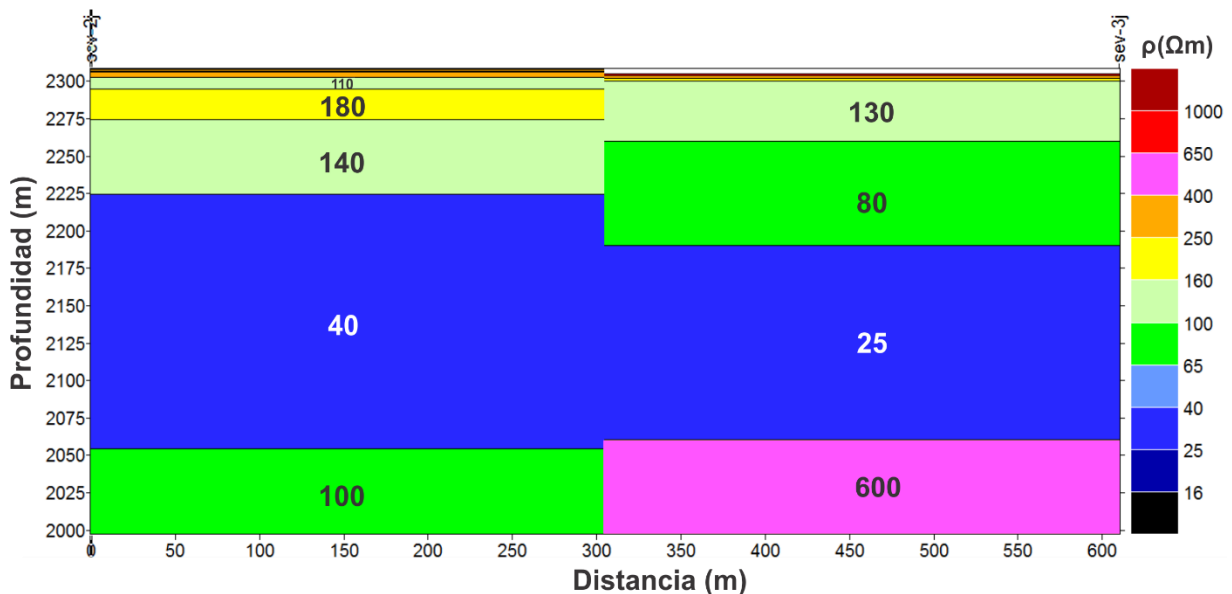


Figura 5.12. Sección geoelectrica del Perfil III-III'J.

Se observa que en la parte inicial de la sección la capa que sobreyace a todas tiene un valor de 370 Ωm con 1 m de espesor, continua una resistividad de 100 Ωm con un espesor de 1 m, en seguida se presenta una capa de 270 Ωm con 3.5 m de espesor, luego se encuentra una resistividad de 110 Ωm con un espesor de 8 m. A una profundidad de 14 m se halla un valor de 180 Ωm con un espesor de 20 m, le sigue una capa de 140 Ωm con un espesor de 50 m y a una profundidad de 34 m, luego se presenta un valor de 40 Ωm con un espesor de 170 m y a una profundidad de 84 m y la capa que subyace a todas las anteriores tiene un valor de 100 Ωm a una profundidad de 254 m.

En la parte final de la sección la capa que sobreyace a todas tiene una resistividad de 1 000 Ωm con 1 m de espesor, seguida de una resistividad de 360 Ωm con un espesor de 1.5 m, posteriormente se observa una capa de 170 Ωm con 2 m de espesor, continua un valor de 130 Ωm con 40 m de espesor. A una profundidad de 45 m se observa una resistividad de 80 Ωm con un espesor de 70 m, luego se tiene un valor de 25 Ωm con 130 m de espesor y a una profundidad de 115 m, la última capa explorada posee un valor de 600 Ωm a una profundidad de 245 m.

Sección del Perfil IV-IV'J

El Perfil IV-IV'J lo constituyen los sondeos SEV-3J y el SEV-1J con una altitud de 2 305 y 2 300 metros respectivamente, observando que la diferencia de altitud entre la parte inicial y final de la sección geoelectrica es de 5 m; la dirección de perfil es NE-SW; presenta una longitud total de 540 metros. La profundidad de exploración alcanzada en la parte inicial de la sección es de 245 m y en la parte final es de 242 m. La parte inicial de la sección comprende desde la posición del SEV-3J hasta los primeros 270 m, mientras que la parte final va de 270 a 540 m (Figura 5.13).

En la parte inicial de la sección, la capa que sobreyace a las demás tiene una resistividad de 1 000 Ωm con 1 m de espesor, continua un valor de 360 Ωm con un espesor de 1.5 m, en seguida se presenta una resistividad de 170 Ωm con 2 m de espesor. A una profundidad de 5 m se encuentra una capa de 130 Ωm con un espesor de 40 m, luego se tiene un valor de 80 Ωm con un espesor de 70 m y a una profundidad

de 45 m, posteriormente se halla un valor de 25 Ωm con 130 m de espesor y a una profundidad de 115 m, la última capa explorada tiene una resistividad de 600 Ωm a una profundidad de 245 m.

Las primeras tres capas que constituyen a la parte final de la sección tienen espesores de 1 metro y resistividades de 250, 100 y 220 Ωm respectivamente, sigue un valor de 35 Ωm con un espesor de 4 m, luego se observa una resistividad de 160 Ωm con un espesor de 15 m. A una profundidad de 22 m se encuentra un valor de 60 Ωm con un espesor de 50 m, posteriormente se observa una capa de 25 Ωm con un espesor de 170 m y a una profundidad de 72 m, la última capa explorada tiene una resistividad de 600 Ωm a una profundidad de 242 m.

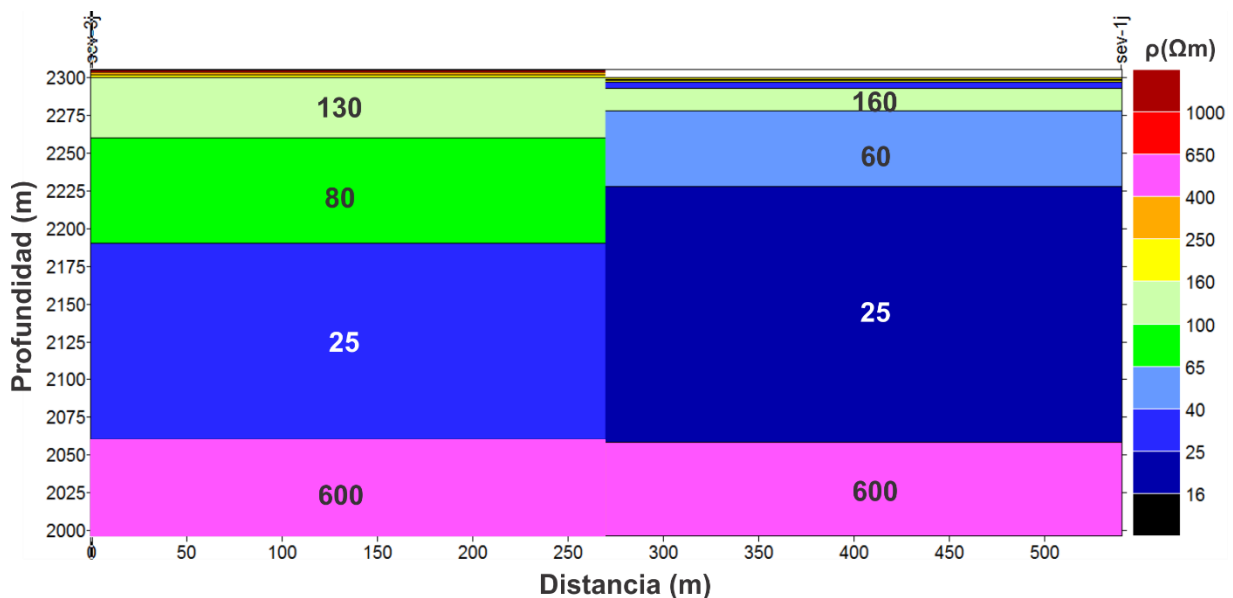


Figura 5.13. Sección geoelectrica del Perfil IV-IV'J.

5.4 Unidades geoelectricas

En base al análisis de los valores de las resistividades de cada una de los cortes geoelectricos de ambas campañas se determinó establecer categorizaciones de las resistividades, de acuerdo a la similitud entre estas, así como también de la información geológica existente en la zona de interés. Dando como resultado cinco rangos de resistividades, además para dar seguimiento al objetivo de conocer si existe

correlación entre unidades geológicas de ambas comunidades se decidió que dichos rangos fueran los mismos para ambas campañas con la finalidad de comprobar dicho objetivo.

En la Tabla 5.2 se muestran los diferentes rangos de resistividades a los cuales se les asoció con una unidad geoelectrica para un mejor manejo de los horizontes geoelectricos que constituyen al subsuelo y posteriormente relacionarlos con las unidades geológicas correspondientes a la zona de estudio.

Tabla 5.2. Relación de las unidades geoelectricas con los valores de resistividades.

Rango de resistividades (Ωm)	Unidades geoelectricas
15-40	U ₁
60-220	U ₂
230-540	U ₃
600-740	U ₄
800-2 200	U ₅

A continuación, se describen las diferentes unidades geoelectricas que integran a las secciones de ambas campañas.

5.4.1 Unidades geoelectricas de San Juan Tepulco

De manera general se observa que la U₁ no se presenta en las secciones geoelectricas de esta campaña. La U₂ se halla en la parte inferior de todas las secciones, así como también a una profundidad de 21 y 48 m debajo de los sondeos SEV-5T y el SEV-4T respectivamente, en horizontes con espesores de 25 y 40 m en los perfiles I-I'T, II-II'T, III-III'T y V-V'T. La U₃ se presenta tanto en la superficie con espesores no mayores a 5 m, así como en la parte media de las secciones a profundidades de 17, 50 y 200 m. La U₄ se encuentra a profundidades de 70 y 88 m

con espesores de 95, 115 y 130 m; sin embargo, en las secciones I-I'T, III-III'T y VI-VI'T se presenta solamente en un extremo de las secciones. La U₅ se halla a lo largo de la parte superior de todas las secciones con espesores delgados, regularmente de 1 a 10 m.

Unidades geoelectricas del Perfil I-I'T

Se observa en la Figura 5.14 que la U₅ se encuentra a lo largo de la parte superior de la sección con valores de resistividades de 820, 850, 1 650, 2 000 y 2 200 Ωm ; pero en la parte inicial de la sección se encuentra sobreyaciendo la U₃ con un valor de 300 Ωm . Posteriormente se encuentra la U₃ a lo largo de toda la sección con resistividades de 540, 270, 230, 380 y 400 Ωm , presentando espesores variables siendo su máximo de 115 m y su mínimo de 55 m.

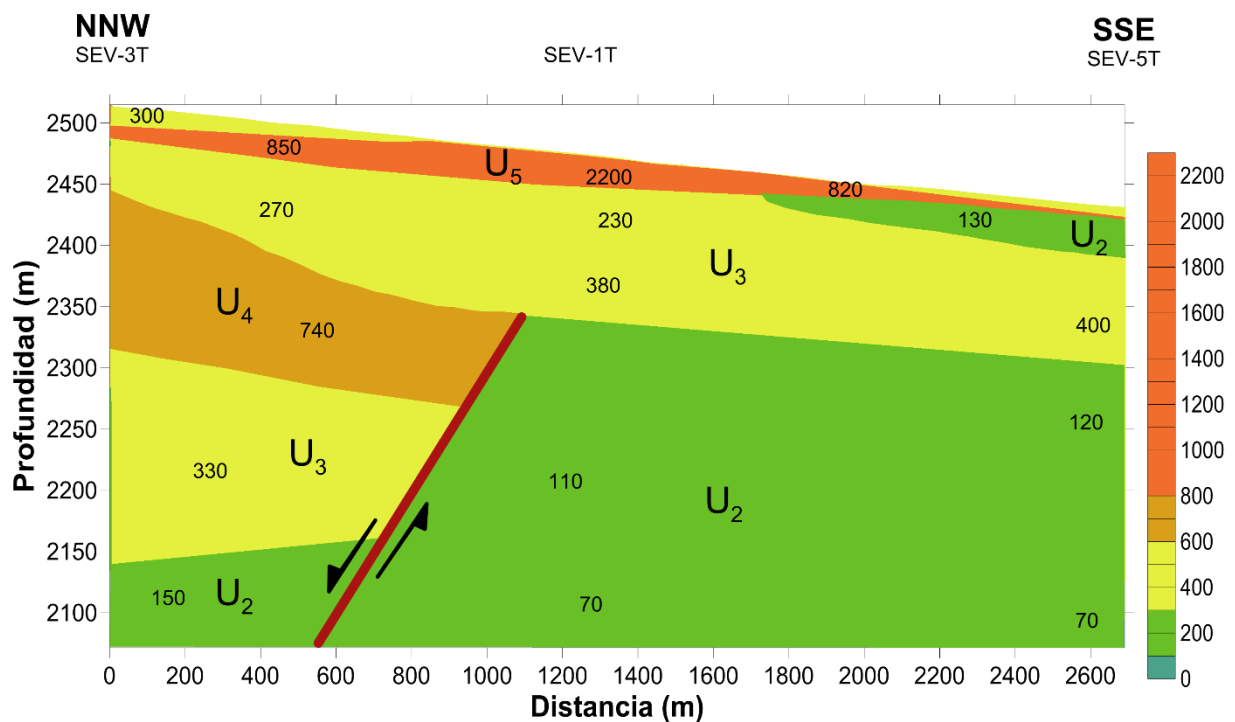


Figura 5.14. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil I-I'T.

La U₄ solamente se presenta en la parte inicial de la sección a una profundidad de 71 m y con una resistividad de 740 Ωm y subyaciéndola está nuevamente la U₃ con una resistividad de 330 Ωm . En la parte inferior se observa la U₂ con valores de 70, 110,

120 y 150 Ωm , la cual desde la parte central de la sección presenta un mayor espesor; sin embargo, como es la última capa explorada no se conoce su espesor real.

Unidades geoelectricas del Perfil II-II'T

En la Figura 5.15 se observa que la U_5 está en la parte superior del perfil con resistividades de 800, 820, 1 350 y 1 450 Ωm , tendiendo su mayor espesor de 4 m en donde se ubica el SEV-4T, pero en la parte inicial de la sección sobreyaciéndola se presenta la U_3 con un valor de 620 Ωm y un espesor de 1 m. La U_3 se encuentra por debajo de la U_5 , a lo largo de toda la sección teniendo un espesor de 50 m en el extremo NE y hacia el NW se presenta con un espesor de 15 m; en la parte inicial del perfil a una profundidad de 184 m también se puede observar esta unidad con un valor de 300 Ωm , mientras que hacia la parte final de la sección a una profundidad de 46 m también se encuentra esta unidad con una resistividad de 400 Ωm . La U_2 se halla en la parte inferior de toda la sección con resistividades de 70, 110, 120 y 150 Ωm , presentándose a una profundidad de 479 m en el extremo NE y hacia el extremo NW a los 378 m; también la U_2 se encuentra desde la parte central hacia la final de la sección a una profundidad de 48 y 21 m con espesores de 40 y 25 m respectivamente.

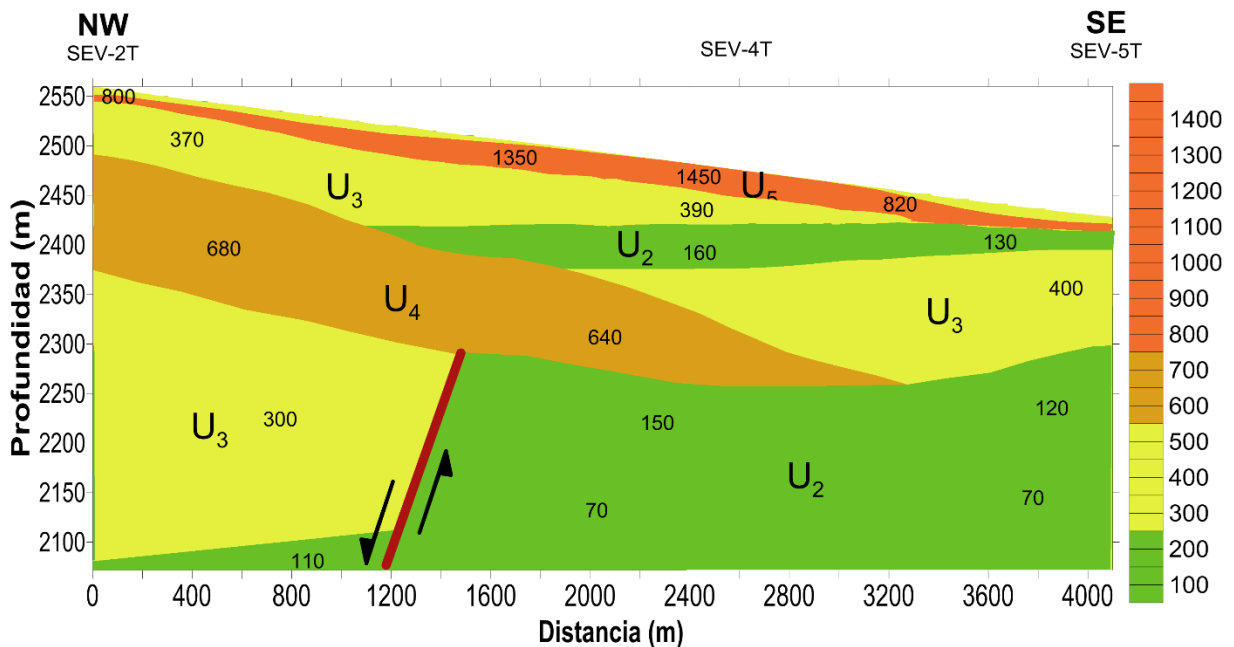


Figura 5.15. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil II-II'T.

Unidades geoelectricas del Perfil III-III'T

En la Figura 5.16 se observa que la U_5 de igual forma que en las secciones anteriores se halla a lo largo de toda la parte superior de la sección, con resistividades de 1 350, 1 450, 2 100 y 2 200 Ωm , teniendo su mayor espesor de 17 m en donde se ubica el SEV-1T y hacia el SEV-4T su espesor disminuye a 5 m. La U_3 está subyaciendo a la U_5 , esta unidad también se encuentra lo largo de toda la sección con un espesor de 115 m en el extremo NE y se vuelve más delgado con 25 m de espesor hacia el SW. La U_4 solamente se encuentra hacia el extremo final de la sección a una profundidad de 88 m con una resistividad de 640 Ωm y un espesor de 95 m. La U_2 se presenta en la parte inferior de toda la sección, desde una profundidad de 132 m en la parte inicial de la sección y a los 88 m de profundidad en la parte final de la sección con valores de 70, 110 y 150 Ωm ; también se encuentra un delgado horizonte con un espesor de 40 m de esta unidad en el extremo final de la sección a una profundidad de 48 m y con una resistividad de 160 Ωm .

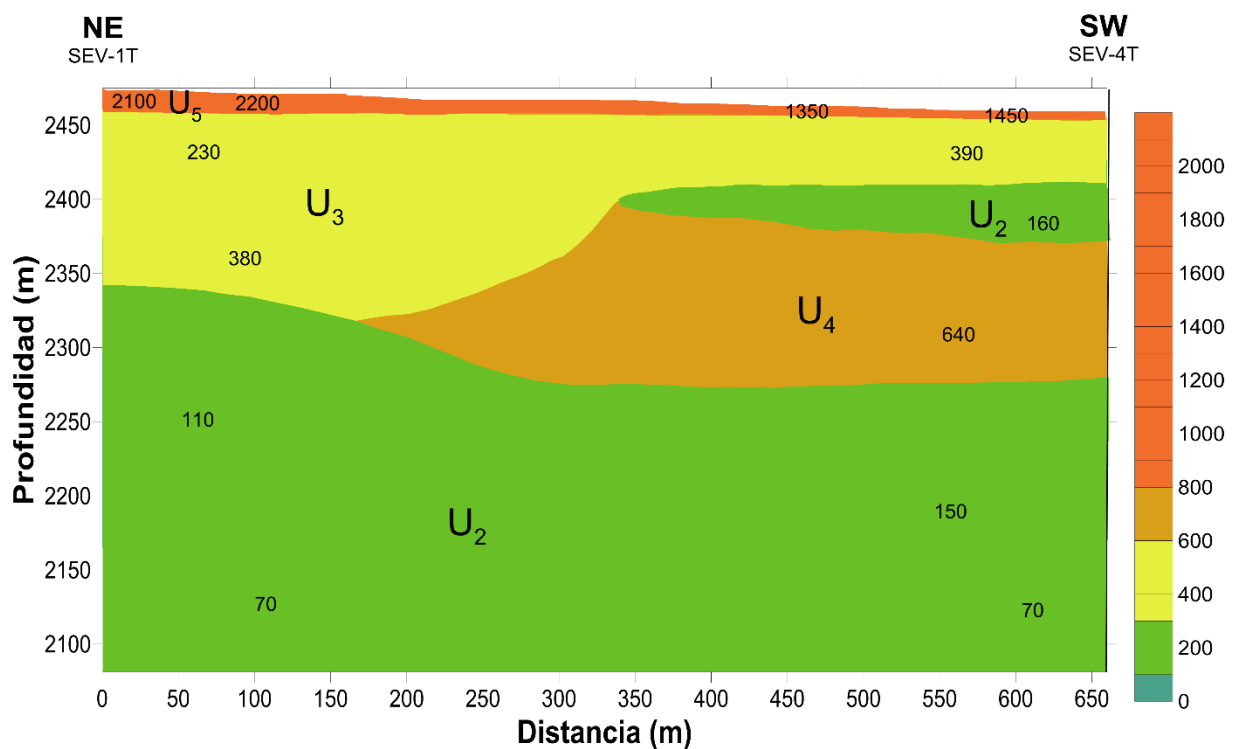


Figura 5.16. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil III-III'T.

Unidades geoelectricas del Perfil IV-IV'T

En la Figura 5.17 se observa que la U_3 se encuentra en la parte superior de toda la sección con resistividades de 470 y 300 Ωm y un espesor no mayor de 5 m. Subyaciendo a la unidad U_3 se encuentra la U_5 , presentando un espesor casi constante de 10 m a lo largo de la sección, con resistividades de 800 y 850 Ωm . Posteriormente a una profundidad de 19 m en extremo W y de 17 m en el extremo E se presenta nuevamente la U_3 a lo largo de toda la sección, la cual también tiene un espesor casi constante de 50 m y valores de 270, 370 y 540 Ωm ; además a una profundidad de 184 y 201 m para la parte inicial y final de la sección respectivamente, nuevamente se encuentra la U_3 . La U_4 se observa a una profundidad de 69 m en la parte inicial de la sección y de 71 m en la parte final de la sección, con resistividades de 680 y 740 Ωm y espesores de 115 y 130 m respectivamente. La U_2 se halla subyaciendo a todas las unidades anteriores con resistividades de 110 y 150 Ωm , y ya que esta unidad la constituyen las últimas capas de la sección no se conoce su espesor real.

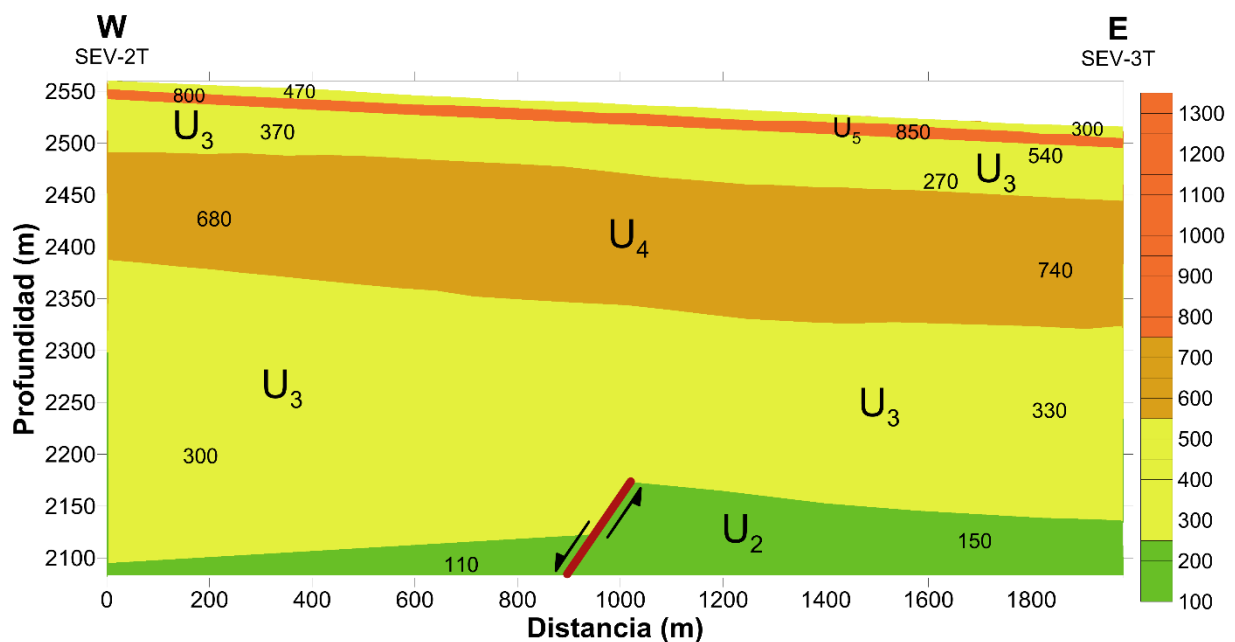


Figura 5.17. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil IV-IV'T.

Unidades geoelectricas del Perfil V-V'T

En la Figura 5.18 se observa que la U_5 se encuentra en la parte superior de la sección con resistividades de 850, 1 350 y 1 450 Ωm , teniendo su mayor espesor de 10 m en el extremo N y hacia el extremo S se vuelve más delgado con 5 m de espesor. La U_3 se encuentra sobreyaciendo a la U_5 en la parte inicial de la sección con una resistividad de 300 Ωm y con un espesor de 1 m; a su vez también se haya subyaciendo a la U_5 , con espesores de 55 y 43 m de la parte inicial a la final de la sección respectivamente, con resistividades de 270, 390, 500 y 540 Ωm ; asimismo se encuentra a una profundidad de 201 m en la parte inicial de la sección. La U_4 se presenta a lo largo de toda la sección a una profundidad de 71 m en el extremo N y 88 m en el extremo S, con resistividades de 740 y 640 Ωm respectivamente. La U_2 se observa en la parte inferior de la sección a una profundidad de 381 m en el SEV-3T y a los 183 m en el SEV-4T; así como también se encuentra a una profundidad de 48 m hacia la parte final de la sección con un espesor de 40 m.

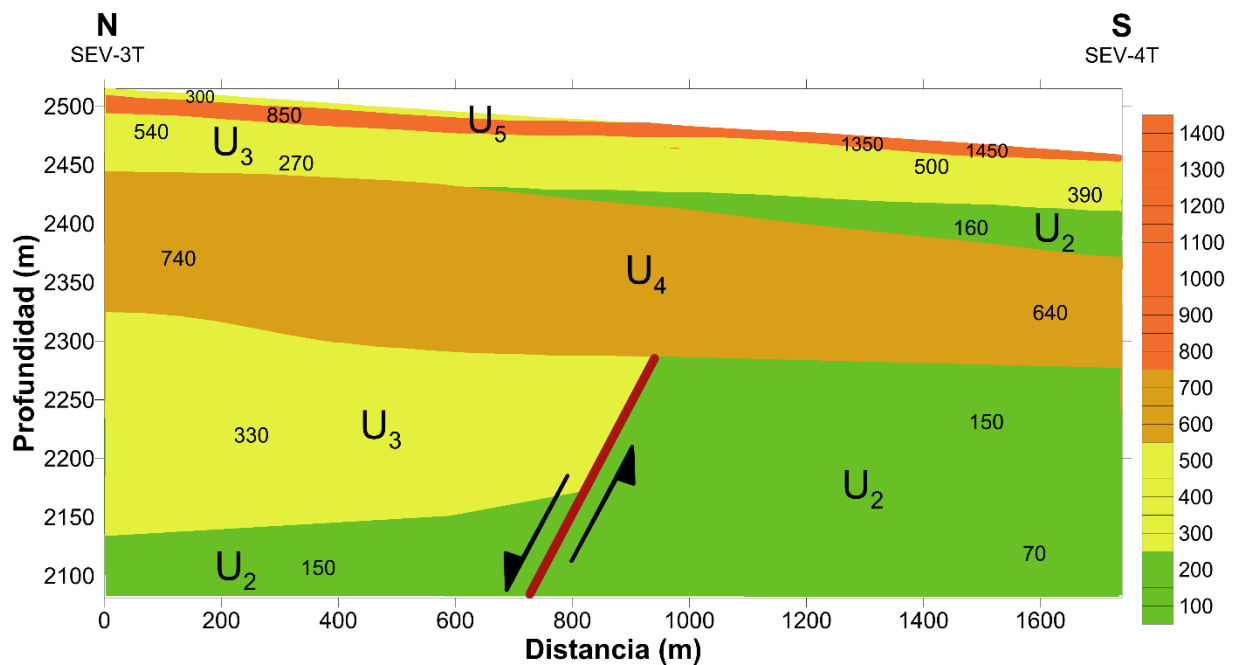


Figura 5.18. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil V-V'T.

Unidades geoelectricas del Perfil VI-VI'T

En la Figura 5.19 se observa que la U_5 se presenta en la parte superior de la seccion, teniendo su mayor espesor de 17 m hacia el extremo SE, con resistividades de 800, 1 650, 2 100 y 2 200 Ωm . La unidad U_3 se encuentra subyaciendo a la U_5 a lo largo de todo el perfil; sin embargo, en la parte inicial de la seccion tiene un espesor de 50 m y una resistividad de 370 Ωm , observando que no tiene continuidad ya que es interrumpida por la U_4 , la cual posee un espesor de 115 m; mientras que en la parte final de la seccion la U_3 presenta un espesor de 115 m y resistividades de 230 y 380 Ωm , notando que este espesor es el mismo que el de la U_4 ; asimismo a una profundidad de 184 m se observa nuevamente la U_3 con una resistividad de 300 Ωm . La U_2 se presenta a lo largo de la parte inferior de la seccion, a una profundidad de 479 m con un valor de 110 Ωm en el SEV-2T y hacia el SEV-1T se halla a los 132 m de profundidad con una resistividad de 70 Ωm .

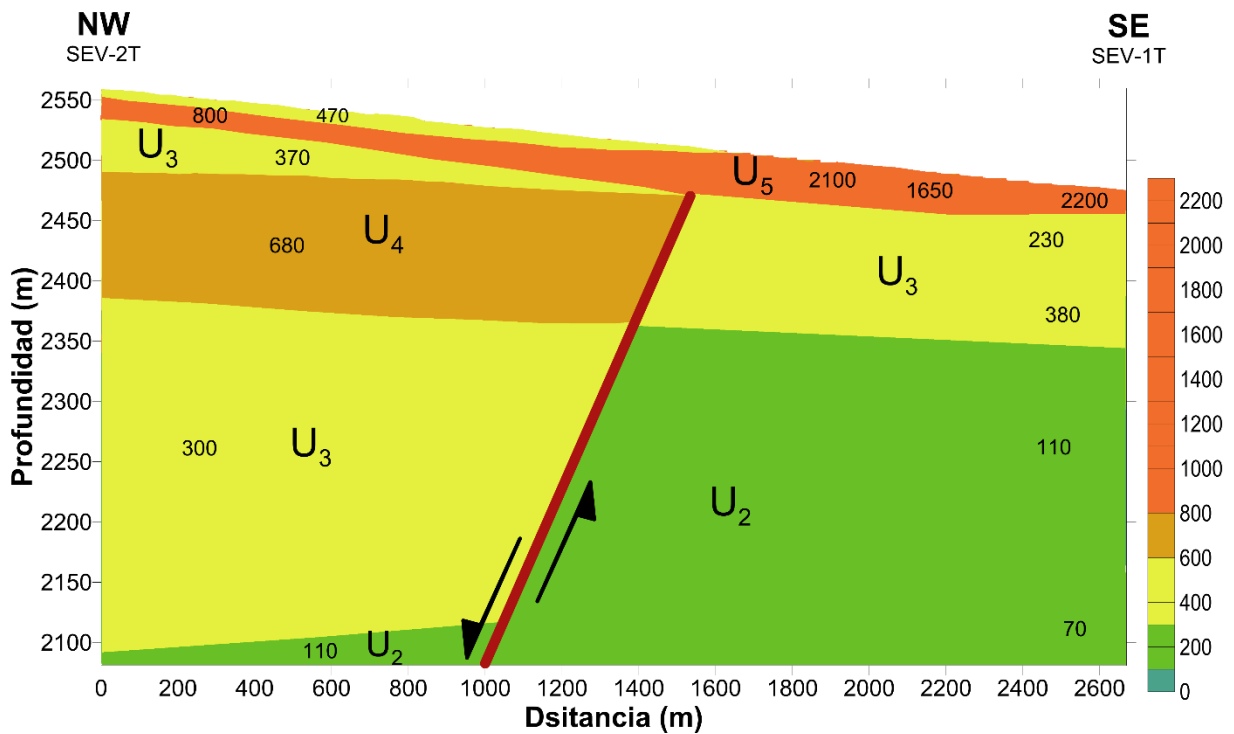


Figura 5.19. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil VI-VI'T.

5.4.2 Unidades geoelectricas de San Jerónimo Ocotitlán

De manera general en las cuatro secciones geoelectricas de San Jerónimo Ocotitlán no se presenta la U_5 . La U_3 se observa en la parte superior de todas las secciones con espesores muy delgados, siendo el espesor máximo de 3.5 m. La U_2 se halla por debajo de la U_3 , asimismo en los perfiles I-I'J y III-III'J se encuentra en la parte inferior de la parte inicial de estos. La U_1 se observa subyaciendo a la U_2 en todas las secciones, así como también en el extremo final de las secciones I-I'J y II-II'J a una profundidad no mayor a 3 m. La U_4 es la que se encuentra debajo de todas las otras unidades geoelectricas, además se presenta a profundidades muy parecidas de 242, 243 y 245 m, y debido a que esta unidad está conformada por las últimas capas exploradas no se conoce el límite de su espesor real.

Unidades geoelectricas del Perfil I-I'J

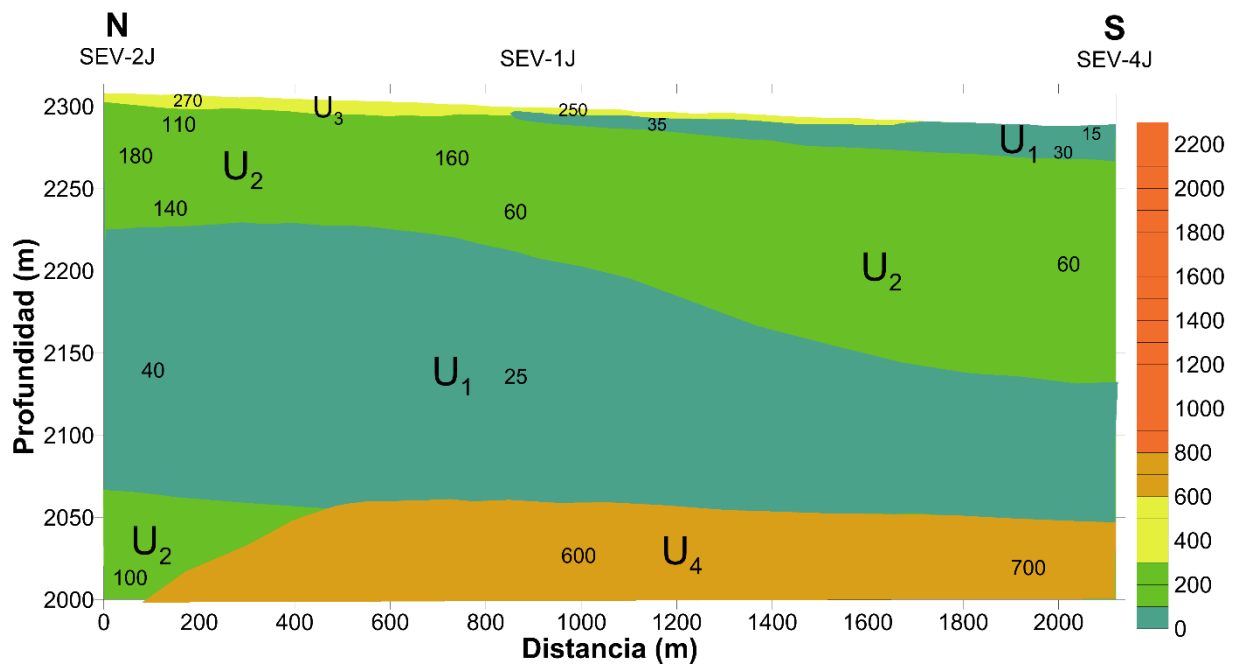


Figura 5.20. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil I-I'J.

En la Figura 5.20 se observa que la U_3 se encuentra en la parte inicial y central de la sección, con espesores de 3.5 y 0.8 m y con resistividades de 270 y 250 Ωm respectivamente. La U_2 se presenta a lo largo de la sección con un espesor variable,

notando su mayor espesor de 150 m hacia el extremo sur de la sección y con resistividades de 60, 110, 140, 160 y 180 Ωm ; también la U_2 se halla en la parte inferior del extremo norte a una profundidad de 254 m y con un valor de 100 Ωm . La U_1 presenta resistividades de 40 y 25 Ωm a una profundidad de 83 m en la parte inicial y 72 m en la parte central de la sección; asimismo se observa esta unidad en la parte superior de la sección en donde se ubica el SEV-4J con resistividades de 15, 20 y 30 Ωm . La U_4 se observa a una profundidad constante de 242 m y con valores de resistividades de 600 y 700 Ωm .

Unidades geoelectricas del Perfil II-II'J

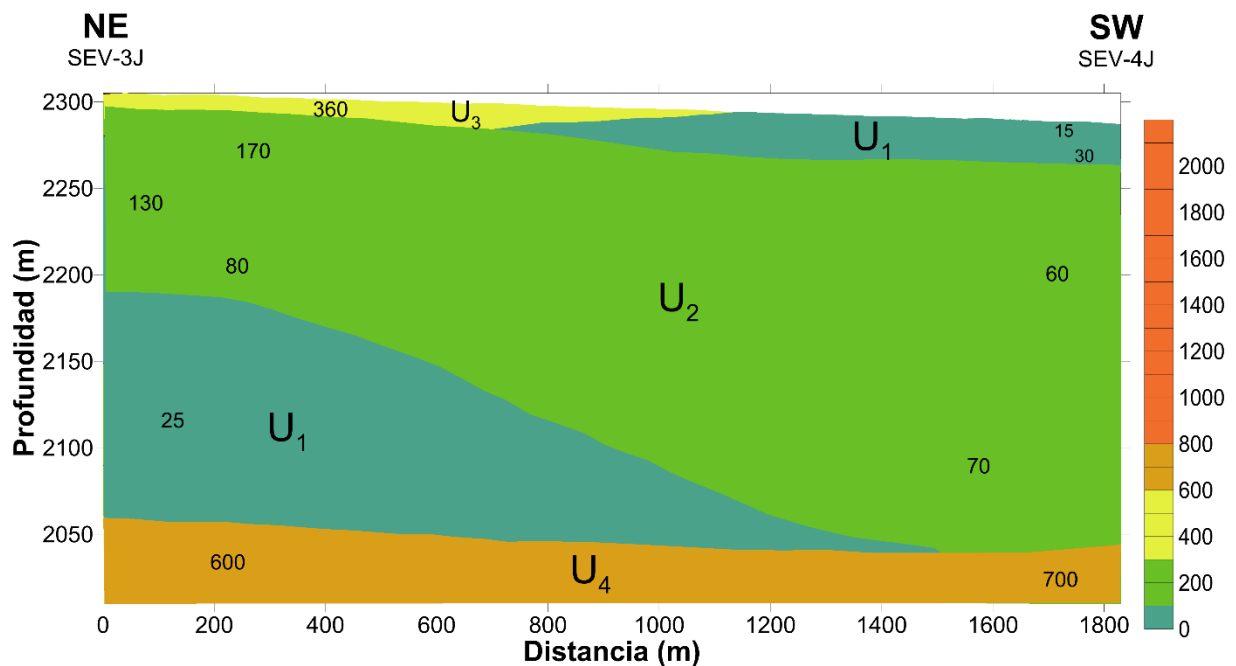


Figura 5.21. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil II-II'J.

En la Figura 5.21 se observa que la disposición de todas las unidades geoelectricas de esta sección es semejante al comportamiento de las unidades de la sección I-I'J. La U_3 se encuentra en la parte superior del extremo NE con una resistividad de 360 Ωm y con un espesor de 1 m. La U_2 se presenta a una profundidad de 3 m en la parte inicial de sección y a los 23 m hacia el extremo final de la sección, su mayor espesor de 150 m se observa en la parte final de la sección y tiene

resistividades de 60, 80, 130 y 170 Ωm a lo largo de toda la sección. La U_1 se encuentra en la parte inicial de la sección a una profundidad de 115 m y con una resistividad de 25 Ωm ; mientras que también se halla expuesta en la parte final de la sección con resistividades de 15, 20 y 30 Ωm . La U_4 se observa a lo largo de la parte inferior de la sección a una profundidad prácticamente constante de 245 y 243 m de la parte inicial a la final de la sección, con resistividades de 600 y 700 Ωm respectivamente.

Unidades geoelectricas del Perfil III-III'J

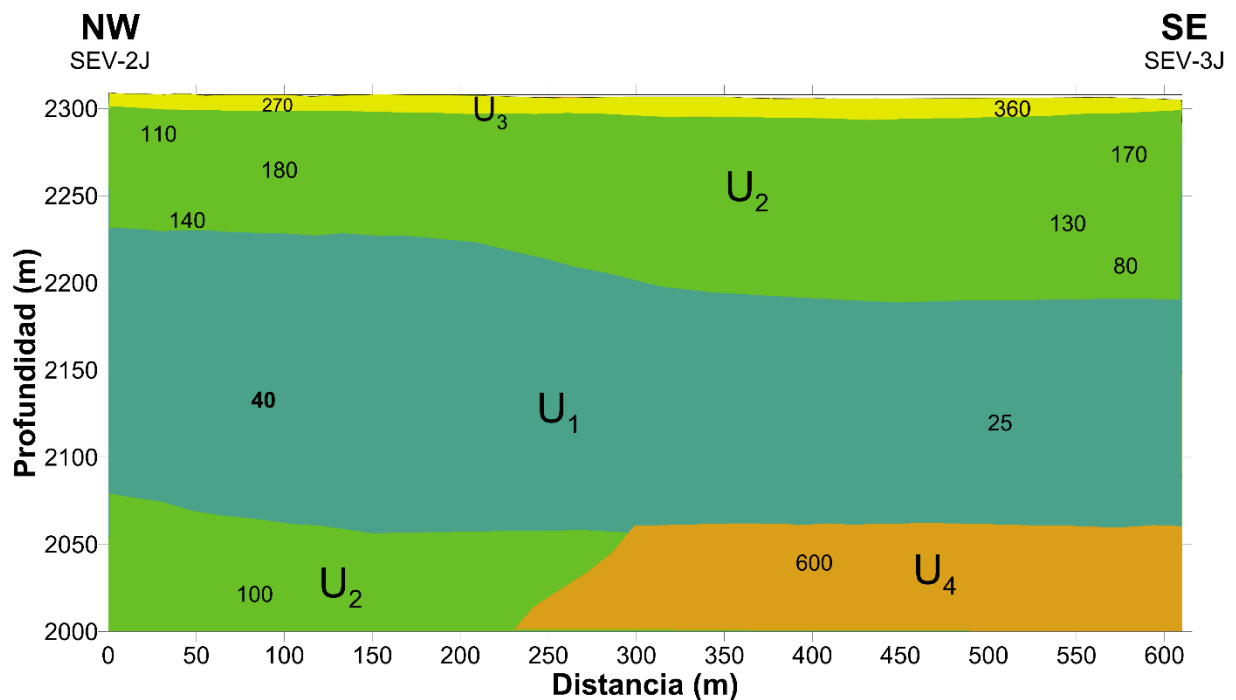


Figura 5.22. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil III-III'J.

En la Figura 5.22 se observa que la U_3 se encuentra sobreyaciendo a todas las demás unidades a lo largo de la sección, con resistividades de 270 y 360 Ωm y con espesores de 3.5 y 1.5 m respectivamente. La U_2 se halla subyaciendo a la U_3 con valores de 80, 110, 130, 140, 170 y 180 Ωm , con un espesor variable de 78 m en la parte inicial de la sección y de 112 m hacia el final de la sección; asimismo la U_2 se halla en la parte inferior de la sección a una profundidad de 254 m y con una resistividad de 100 Ωm . La U_1 se encuentra debajo de la U_2 con resistividades de 40 y 25 Ωm presentando su mayor espesor de 170 m en el extremo NW, el cual hacia el

extremo SE es de 130 m. La U_4 se presenta únicamente hacia la parte final de la sección en su parte inferior, con una resistividad de $600 \Omega\text{m}$ y a una profundidad de 245 m.

Unidades geoelectricas del Perfil IV-IV'J

En la Figura 5.23 se observa que la U_3 constituye la parte superior de la sección con espesores muy delgados de 1.5 y 0.8 m y con resistividades de 360 y $250 \Omega\text{m}$ respectivamente. La U_2 se halla por debajo de la U_3 con resistividades de 60, 80, 100, 130, 160 y $170 \Omega\text{m}$ y con un espesor de 112 m en la parte inicial de la sección, el cual hacia la parte final de la sección es de 67 m. La U_1 se encuentra subyaciendo a las dos unidades anteriores, con una resistividad de $25 \Omega\text{m}$ a lo largo de toda la sección y con un espesor de 130 m en el extremo NE y de 170 m hacia el extremo SW. La U_4 subyace a todas las unidades anteriores, presenta una resistividad constante de $600 \Omega\text{m}$ a lo largo de la sección y se observa a una profundidad casi constante de 245 m en la parte inicial de la sección y de 242 m en la parte final de la sección.

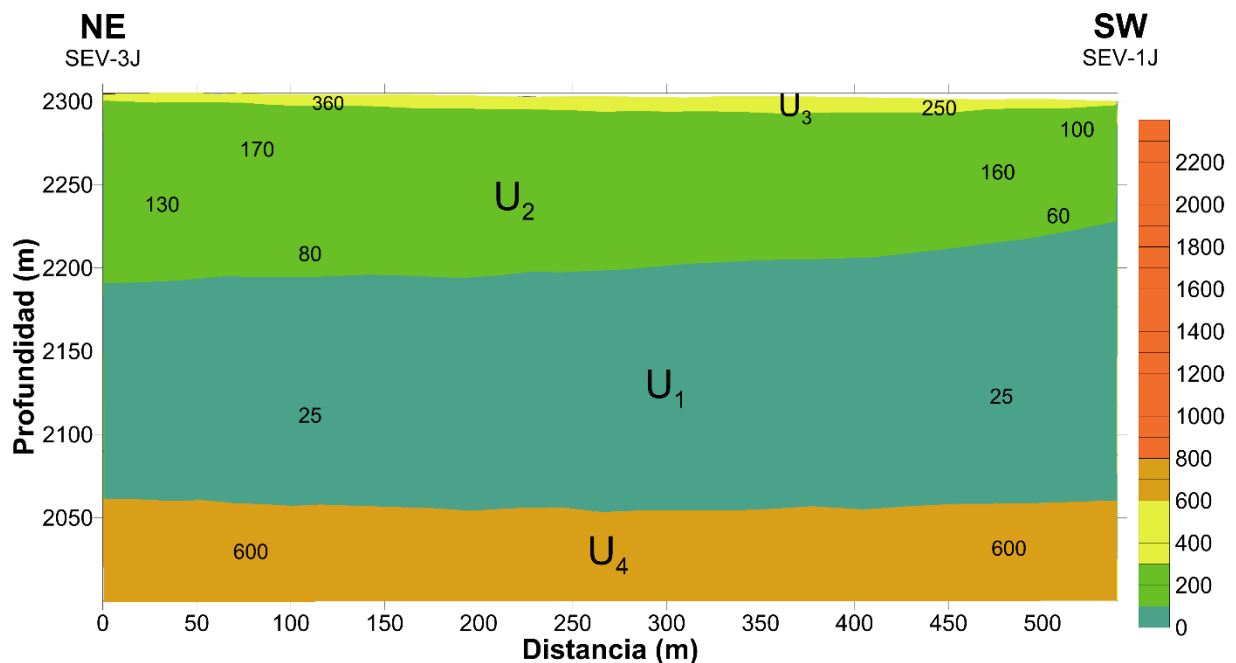


Figura 5.23. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil IV-IV'J.

5.4.3 Correlación de las unidades geoelectricas entre ambas comunidades

Para conocer si existe relación entre las unidades geoelectricas y en consecuencia en las unidades geológicas presentes en las comunidades objeto de estudio, se decidió realizar un perfil que estuviese conformado por los sondeos de ambas comunidades, con el mayor número de sondeos, así como también que fuera lo más recto posible; dando como resultado la construcción del Perfil A-A', compuesto por los perfiles V-V'T y el I-I'J, que a su vez están integrados por los sondeos SEV-3T, SEV-4T, SEV-2J, SEV-1J y el SEV-4J.

El Perfil A-A' presenta una diferencia de altitud de 228 m con respecto del primer sondeo el SEV-3J con una altura de 2 515 m y el último sondeo el SEV-4J con una altitud de 2 287 m, esta diferencia se debe principalmente a que el SEV-3T forma parte de las laderas inferiores de La Malinche. La dirección del perfil es N-S y posee una longitud total de 10 490 m, en donde los primeros 1 740 m conforman al Perfil V-V'T y los últimos 2 120 m constituyen al Perfil I-I'J, notando que la distancia entre ambos perfiles es de 6 630 m; por lo que la parte inicial del perfil corresponde a los primeros 1 740 m, la parte central corresponde de 1 740 a 8 370 m y la parte final de la sección de 8 370 a 10 490 m. Debido a que en el tema de Cortes geoelectricos se describieron las secciones a detalle con respecto a las resistividades, profundidades y espesores, en este apartado se hará mención de estas características de una forma más general con respecto a las unidades geoelectricas que lo conforman.

En la Figura 5.24 se observa que la U_5 solamente se encuentra a lo largo de los sondeos SEV-3T y el SEV-4T con un espesor de 10 m, aflorando en donde se ubica el SEV-4T. La U_3 que se presenta en la parte inicial del perfil a una profundidad de 17 m y con un espesor de 55 m se correlacionó con la U_3 del sondeo SEV-2J y del SEV-1J, donde en estos últimos sondeos se halla en la parte superior de la sección con espesores de 3.5 y 0.8 m respectivamente; asimismo la U_3 se observa a una profundidad de 201 m en el extremo norte de la sección.

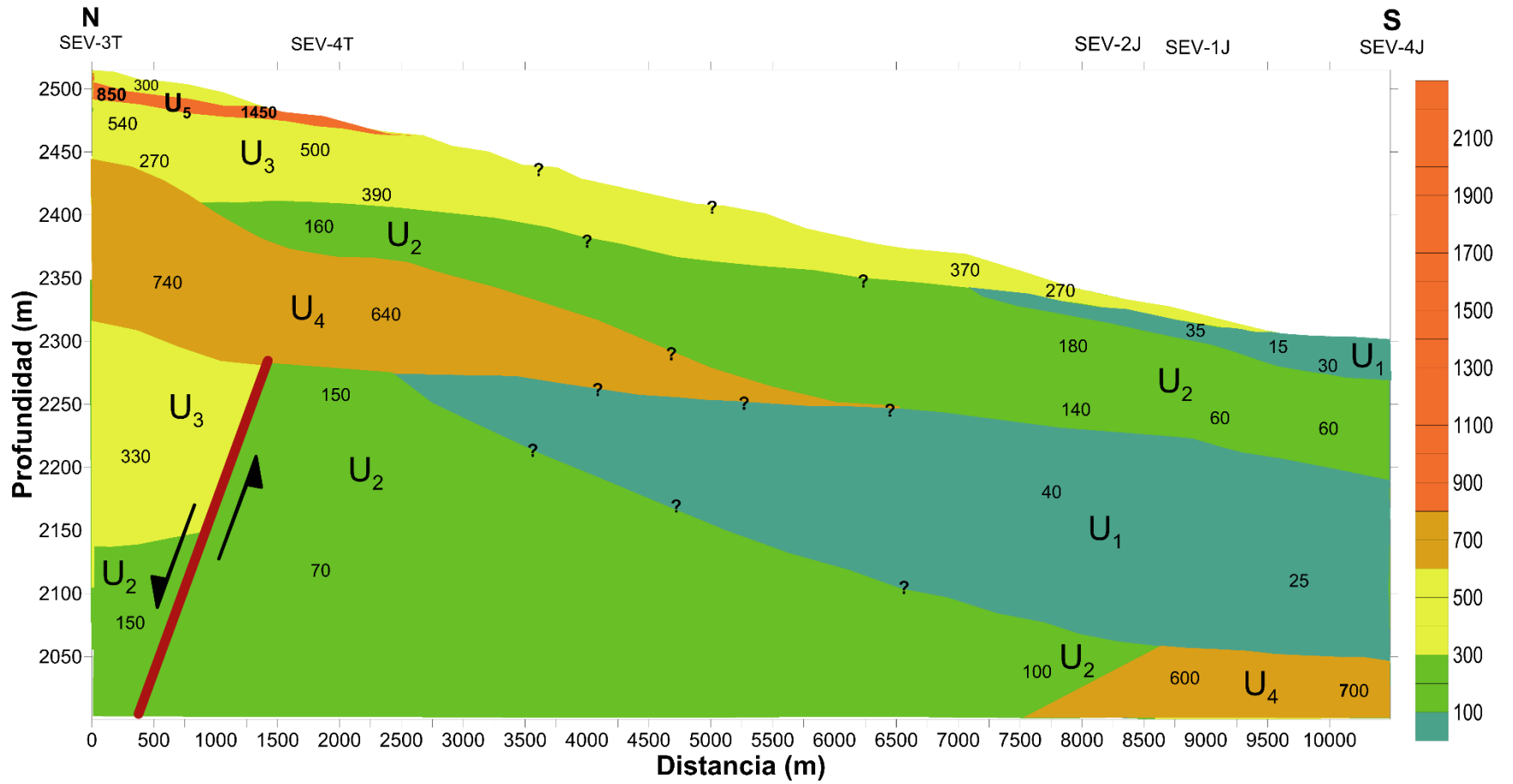


Figura 5.24. Unidades geoelectricas presentes en el Perfil A-A'.

La U₄ se presenta en la parte inicial de la sección a una profundidad de 71 m, en la cual su espesor disminuye hasta desaparecer a lo largo de la parte central del perfil, también la U₄ se halla en la parte inferior del extremo sur de la sección a una profundidad de 470 m con respecto del SEV-3T. La U₂ se presenta por debajo del SEV-4T a una profundidad de 48 m, la cual se correlacionó con la U₂ que se encuentra a una profundidad de 5 m a lo largo de los sondeos SEV-2J, SEV-1J y el SEV-4J; también la U₂ se observa en la parte inicial de la sección constituyendo las últimas capas exploradas, esta unidad también se correlacionó con la U₂ que se encuentra a una profundidad de 254 m por debajo del SEV-2J. La U₁ se presenta únicamente en la parte final de la sección, pero para darle una mejor presentación a esta unidad se prolongó hasta casi llegar al SEV-4T; asimismo la U₁ se encuentra en la parte superior del extremo sur del perfil con un espesor máximo de 23 m.

5.5 Interpretación geológica

La interpretación geológica se realizó en base al análisis de las unidades geoelectricas tanto de las 10 secciones conformadas por ambas campañas como del Perfil A-A'; asimismo se consideró la geología superficial observada en las zonas de interés, así como también de la geología regional apoyada en las cartas geológicas del INEGI (E14B44) y del SGM (E14-3 Veracruz) y de la información recabada con anterioridad. Dando como resultado la propuesta de cinco unidades geológicas correspondientes con las unidades geoelectricas (Tabla 5.3); sin embargo, cuando se realizó la correlación de las unidades geoelectricas del Perfil A-A', se observó que la U₄ con un rango de resistividades de 600 a 740 Ω m asociada a andesitas basálticas fracturadas no es la misma unidad geológica para ambas comunidades; debido principalmente a la profundidad a la que se encuentra en las secciones de cada comunidad. En San Juan Tepulco si corresponde a andesitas basálticas fracturadas (U_{4a}), las cuales se presentan a una profundidad no mayor a 90 m y con espesores de 115, 130 y 95 m, el cual disminuye hacia la parte central de la sección, pero en San Jerónimo Ocotitlán se asoció a calizas limosas (U_{4b}), las cuales constituyen la base de todos los eventos volcánicos posteriores descritos, ya que se encuentra a una

profundidad de 470 m con respecto al sondeo SEV-3T, obteniendo por tanto seis unidades geológicas.

Asimismo, se infirió una falla sinsedimentaria de tipo inversa en la parte inferior de los Perfiles I-I'T, II-II'T, IV-IV'T, V-V'T, VI-VI'T; este tipo de falla se caracteriza por originarse contemporáneamente al depósito del material e indica la desaparición lateral de una unidad de manera brusca con una superficie plana coincidente con la falla.

Tabla 5.3. Asociación de las unidades geoeléctricas con la geología correspondiente a las zonas de interés.

Rango de resistividades (Ωm)	Unidades geoeléctricas	Geología asociada
15-40	U ₁	Tobas limo arcillosas
60-220	U ₂	Tobas areno limosas de mediana consolidación, cenizas y lapillis
230-540	U ₃	Piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial
600-740	U _{4a} U _{4b}	Andesitas basálticas fracturadas (SJT) Calizas limosas (SJO)
800-2 200	U ₅	Tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas

A continuación, se describen las secciones geológicas de ambas campañas, así como también las unidades geológicas que integran al Perfil A-A'.

5.5.1 Perfiles geológicos de San Juan Tepulco

Unidades geológicas del Perfil I-I'T

En la Figura 5.25 se observa que la unidad que se encuentra en la superficie de la parte inicial y final de la sección es asociada a piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con resistividades de 300 y 440 Ω m y con espesores muy delgados de 1 y 1.5 m respectivamente. La unidad geológica que se encuentra en la superficie de la parte central de la sección se asocia con tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas con resistividades de 820, 850, 1 650, 2 000 y 2 200 Ω m.

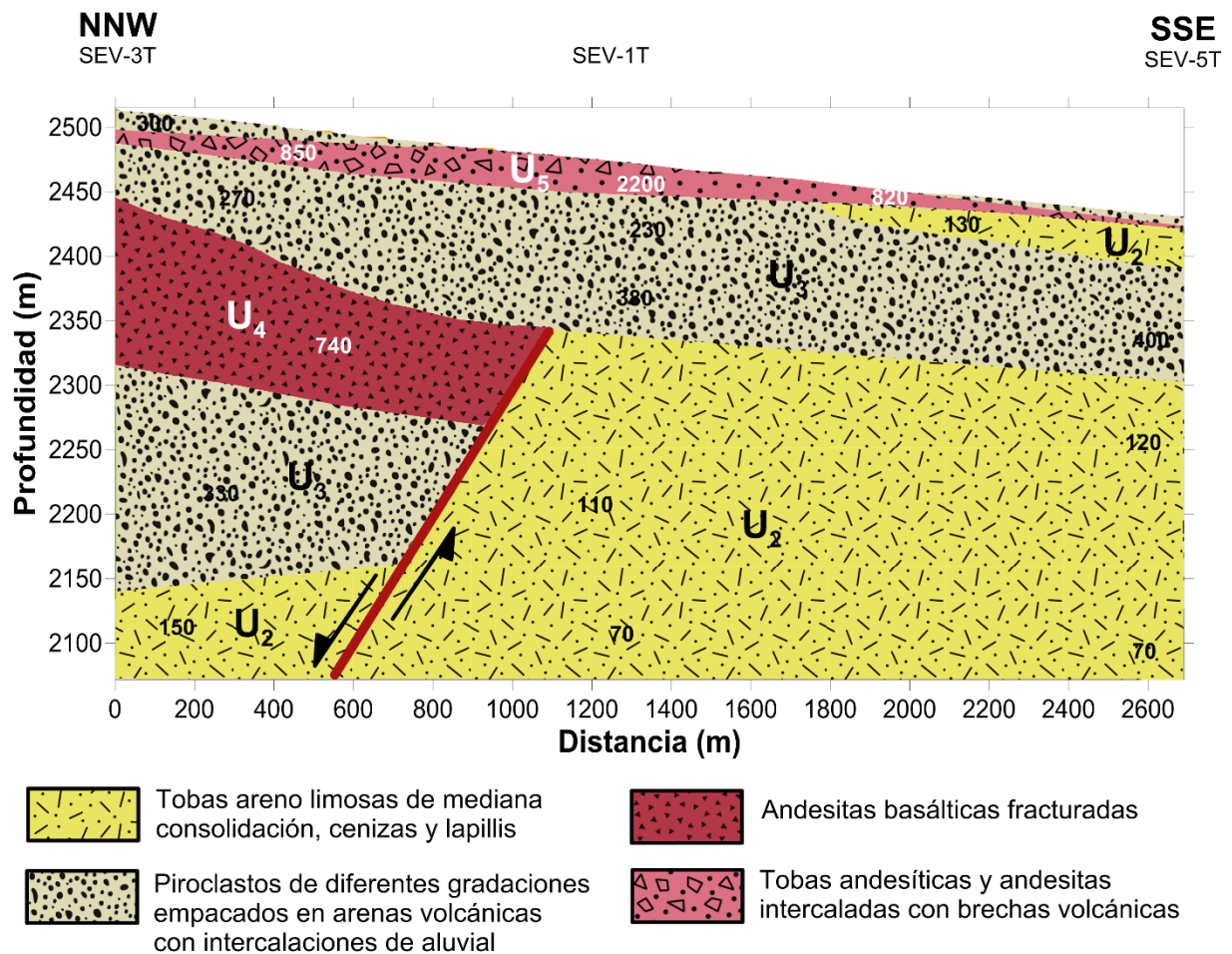


Figura 5.25. Unidades geológicas presentes en el Perfil I-I'T.

Posteriormente a lo largo del perfil se observan nuevamente los piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, presentando espesores variables siendo su máximo de 115 m y su mínimo de 55 m y con resistividades de 540, 270, 230, 380 y 400 Ω m. A una profundidad de 132 m y entre el SEV-3T y el SEV-1T se encuentra la falla sinsedimentaria de tipo inversa la cual produjo que la unidad asociada a tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis fuera la afectada. Provocando en consecuencia el levantamiento del bloque que se encuentra a partir del SEV-1T y la caída del bloque de SEV-3T, propiciando una diferencia de altitud entre dichos bloques de 249 m; lo que a su vez provocó que se formara un escarpe el cual fue rellenado por materiales piroclásticos con un espesor de 180 m, así como también por las andesitas basálticas fracturadas con un espesor máximo de 130 m, razón por la cual no se observa la continuidad de estas unidades hacia la parte final de la sección.

Unidades geológicas del Perfil II-II'T

En la Figura 5.26 se observa que la unidad que se encuentra expuesta en los extremos NW y SE de la sección se asocia con materiales piroclásticos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con espesores de 1 m y resistividades de 620 y 630 Ω m; en tanto que la unidad que se encuentra expuesta debajo del SEV-4T son tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas presentando en esta parte su máximo espesor de 4 m y valores de 800, 820, 1 350 y 1 450 Ω m. Subyaciendo a estas unidades se halla nuevamente el material piroclástico empacado en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial a lo largo de toda la sección, con un espesor de 50 m en el extremo NE y de 15 m hacia el NW.

En la parte inferior de la sección entre los sondeos SEV-2T y SEV-4T se encuentra la falla sinsedimentaria inversa, la cual afectó a la unidad asociada a tobas areno limosas de mediana consolidación, luego se produjo la depositación de los piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas. Posteriormente al desarrollo

de la falla se originó una colada andesítica; la cual probablemente a su velocidad y volumen se extendió a una distancia más allá de la falla, quedando en contacto discordante con el material piroclástico de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas, presentando este último un espesor de 80 m y una resistividad de 400 Ω m.

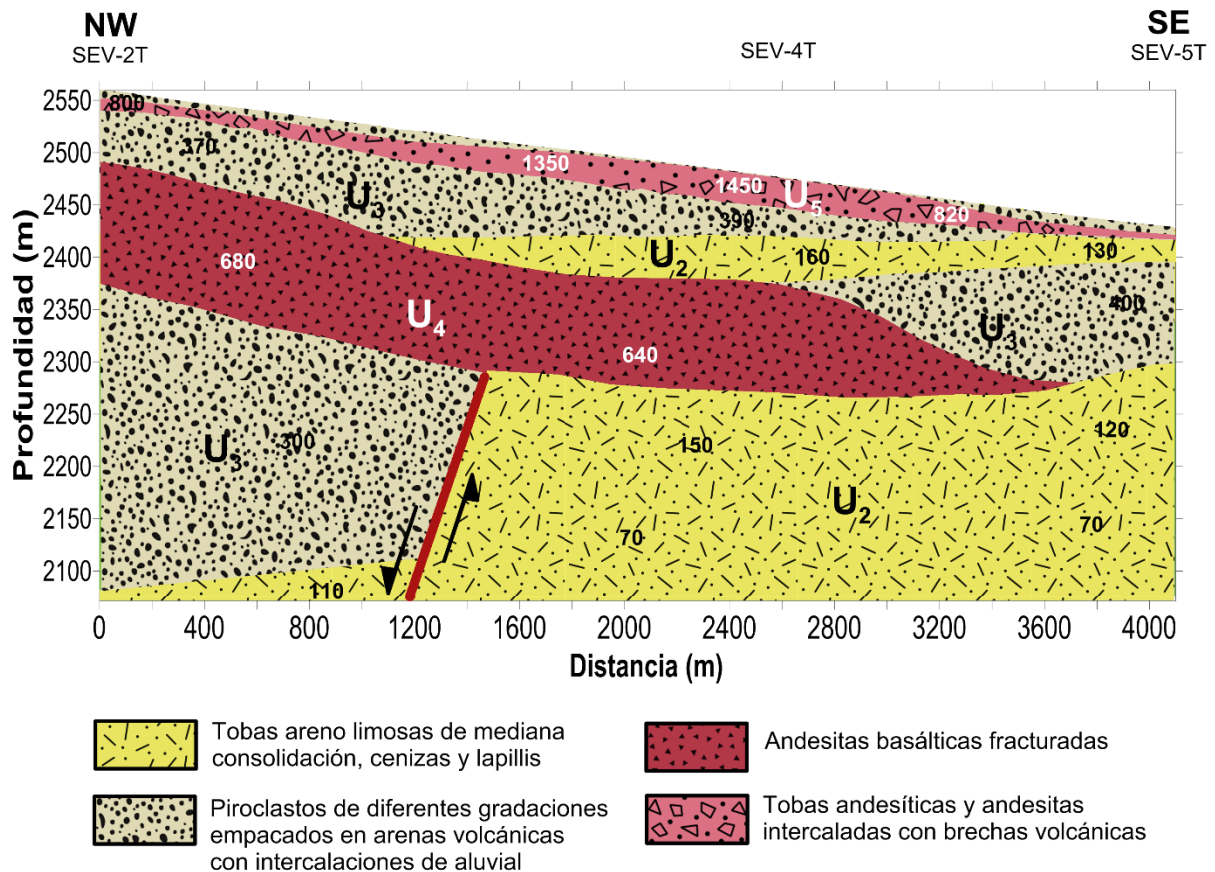


Figura 5.26. Unidades geológicas presentes en el Perfil II-II'T.

Unidades geológicas del Perfil III-III'T

En la Figura 5.27 se observa que la unidad geológica que esta sobreyaciendo a todas las demás unidades se asocia con tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas presentando un espesor de 17 m en la parte inicial de la sección y de 5 m hacia el final de la sección, con resistividades de 1 350, 1 450, 2 100 y 2 200 Ω m. Subyaciendo a esta unidad se presenta material piroclástico de diferentes

gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, teniendo su mayor espesor de 115 m en el extremo inicial de la sección y de 25 m hacia la parte final de la sección, la disminución de su espesor se debe a que es acuñada por una colada andesítica basáltica fracturada y un horizonte de tobas areno limosas de mediana consolidación, cenizas y lapillis; la presencia de esta colada en la parte final de la sección se debe a que el flujo sigue una dirección paralela a las laderas del volcán y en este perfil se encuentra perpendicular a dicha dirección. Subyaciendo a todas las unidades geológicas anteriores se encuentran unas tobas areno limosas de mediana consolidación, cenizas y lapillis a una profundidad de 201 y 183 m.

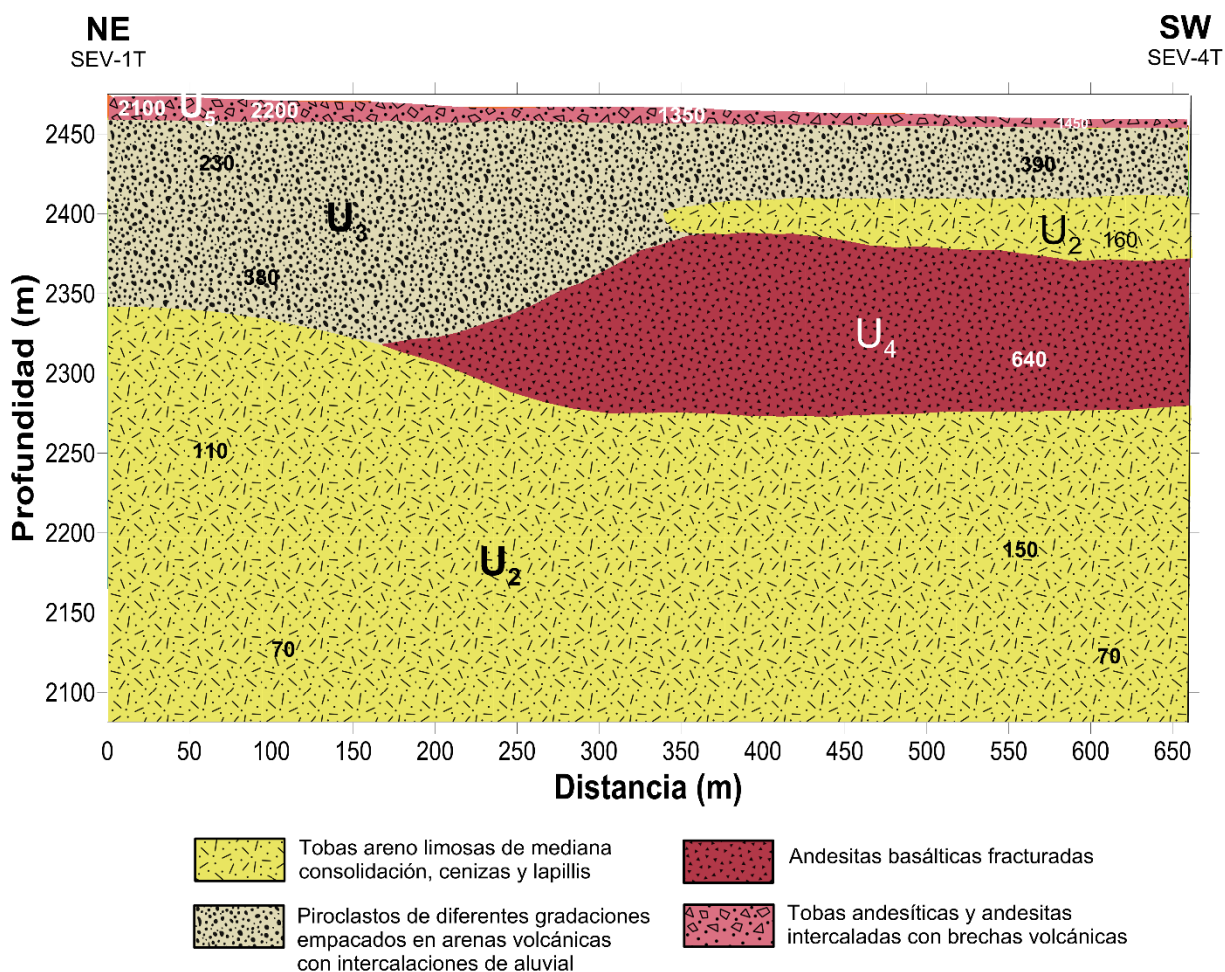


Figura 5.27. Unidades geológicas presentes en el Perfil III-III'T.

Unidades geológicas del Perfil IV-IV'T

En la Figura 5.28 se observa inmediatamente que la disposición de la mayoría de las unidades geológicas que integran a este perfil es más semejante al relieve de la zona y que los espesores de una misma unidad no son tan variables. El material que sobreyace a todos lo demás es asociado con piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con resistividades de 540, 470 y 300 Ω m y un espesor no mayor de 5 m. Inmediatamente debajo de esta unidad se encuentran tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas, cuyo espesor en la parte inicial es de 12 m y de 10 m hacia la parte final.

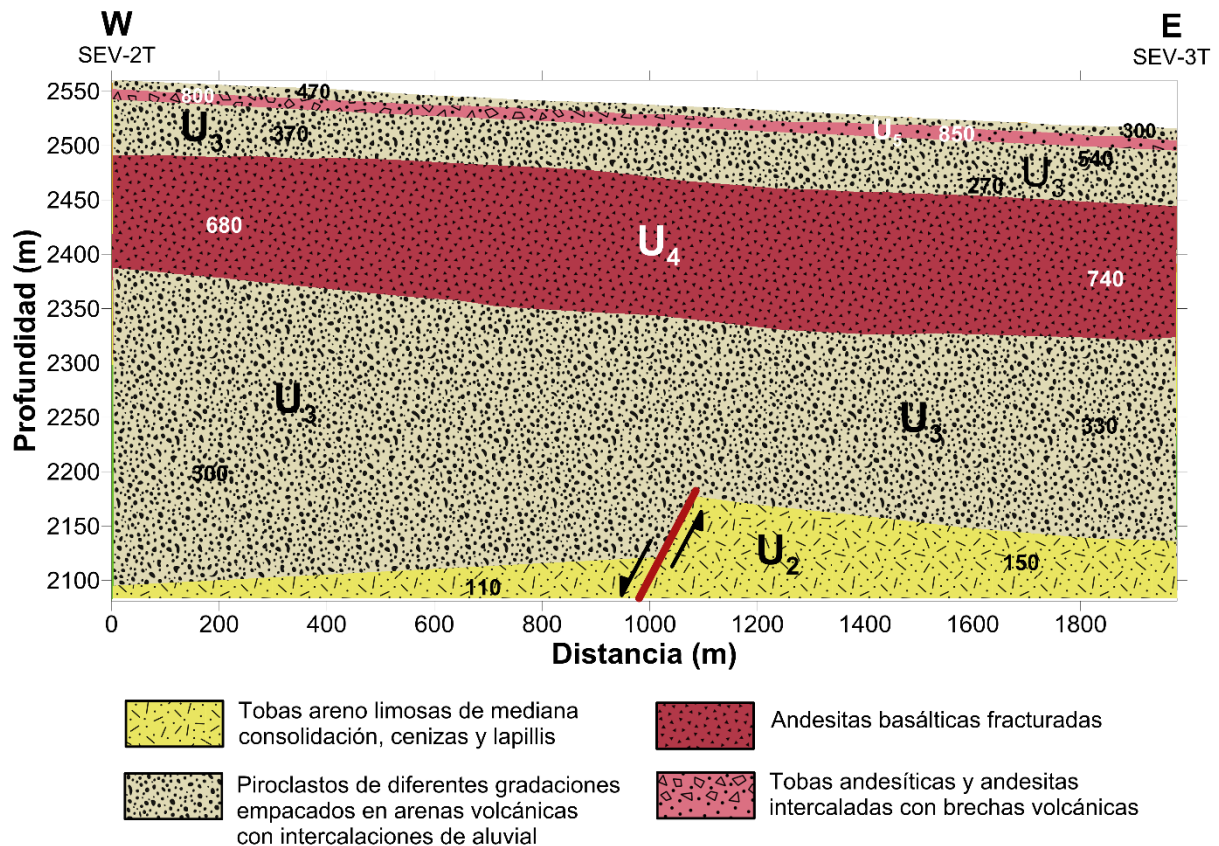


Figura 5.28. Unidades geológicas presentes en el Perfil IV-IV'T.

Posteriormente a una profundidad de 19 m en la parte inicial de la sección y de 17 m hacia la parte final de la sección se presenta nuevamente el material piroclástico de

diferentes gradaciones empacados en arenas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con un espesor también casi constante a lo largo de la sección de 50 m y resistividades de 270, 370 y 540 Ωm ; esta unidad litológica también se presenta a una profundidad de 184 y 201 m para la parte inicial y final de la sección respectivamente. Las andesitas basálticas fracturadas se encuentran a una profundidad de 69 m en la parte inicial de la sección y de 71 m en la parte final de la sección, con resistividades de 680 y 740 Ωm y espesores de 115 y 130 m respectivamente. La última unidad que integra a esta sección corresponde a tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, la cual es afectada por una falla sinsedimentaria inversa que se encuentra a la mitad del perfil.

Unidades geológicas del Perfil V-V'T

En la Figura 5.29 se observa que la unidad asociada a tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas se encuentra a lo largo de la sección, pero se halla expuesta hacia la parte final de esta; ya que en la parte inicial de la sección es sobreyacida por material piroclástico de diferentes gradaciones. Subyaciendo a dicha unidad se encuentran piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con espesores de 55 y 43 m de la parte inicial a la final de la sección respectivamente y resistividades de 270, 390, 500 y 540 Ωm .

A lo largo de la sección a una profundidad de 71 m en el extremo N y 88 m en el extremo S con resistividades de 740 y 640 Ωm respectivamente, se encuentra la unidad asociada a andesitas basálticas fracturadas; la cual se originó posteriormente al desarrollo de la falla, por ello su continuidad en todo el perfil. En este perfil también se observa la falla sinsedimentaria inversa en la parte media-inferior de la sección, afectando a la unidad de tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis; debido al deslizamiento de los bloques se formó un escarpe el cual fue rellenado por piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas lo que explica su discordancia en su disposición con las otras unidades, además esto también se debe a que la distribución de estos materiales está en función del grado de

explosividad del volcán, el tiempo de duración del evento y de la dirección predominante del viento.

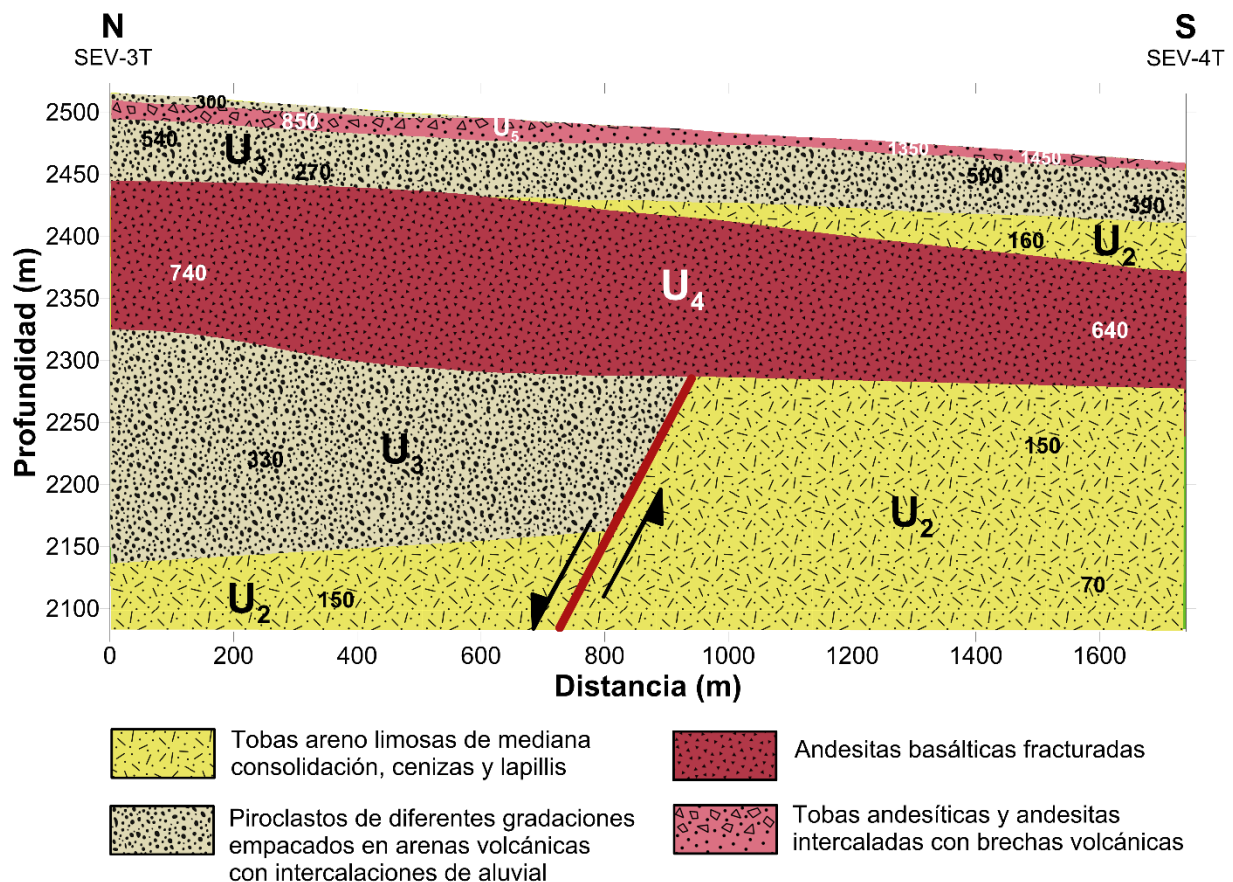


Figura 5.29. Unidades geológicas presentes en el Perfil V-V'T.

Unidades geológicas del Perfil VI-VI'T

En la Figura 5.30 se observa que la unidad de tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas se presenta a lo largo del perfil, con un espesor máximo de 17 m hacia el extremo SE y con resistividades de 800, 1 650, 2 100 y 2 200 Ω m; sin embargo, en el extremo NW esta unidad es sobreyacida por piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con un espesor de 5 m y resistividades de 470 y 540 Ω m.

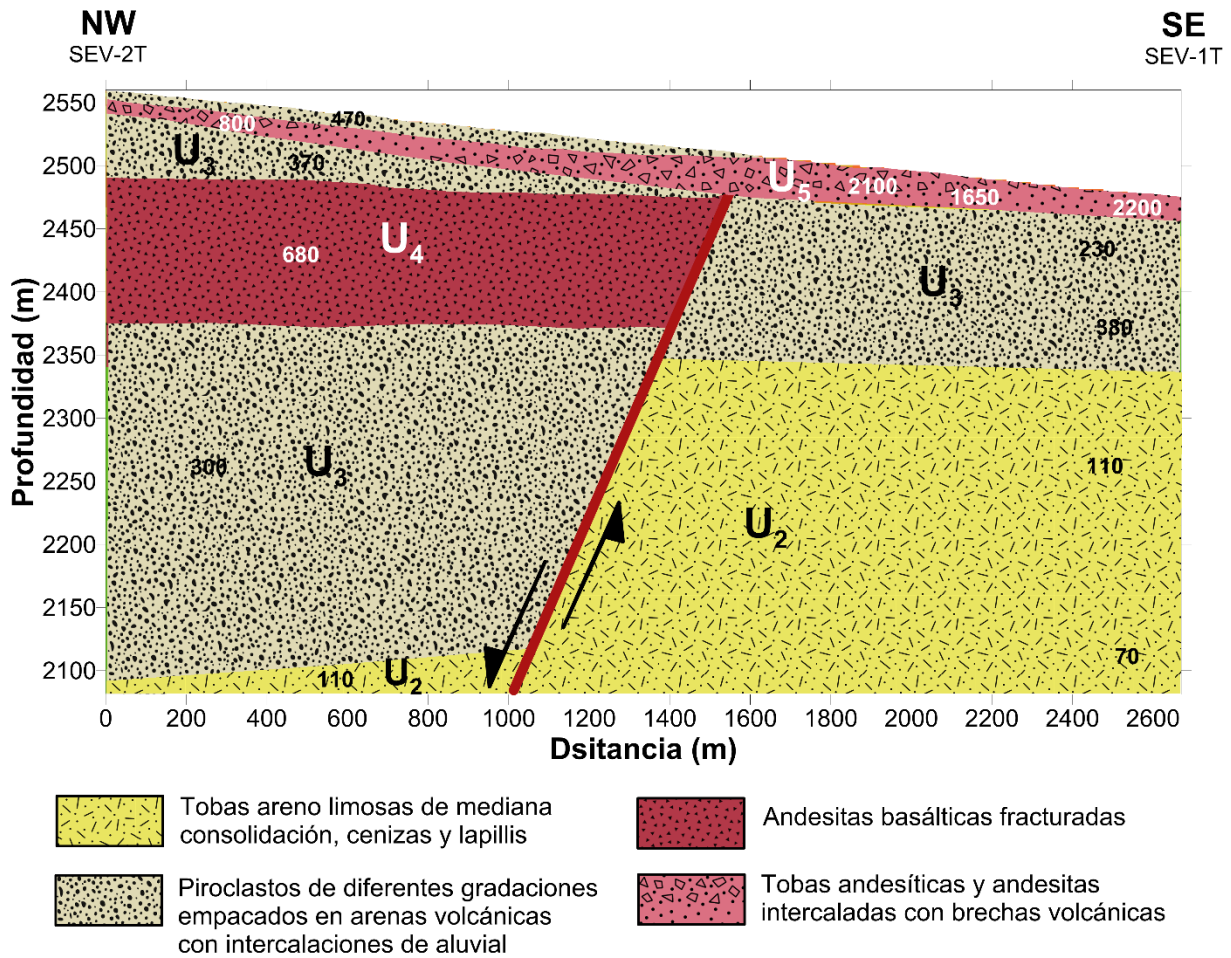


Figura 5.30. Unidades geológicas presentes en el Perfil VI-VI'T.

En este perfil también se presenta la falla sinsedimentaria inversa en la parte central de la sección, la cual a su vez atravesó a casi toda la sección, ya que se encuentra a una profundidad no mayor de 20 m, afectando a las unidades de tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis; a los piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial y a las andesitas basálticas fracturadas, al parecer el desarrollo de esta falla es contemporáneo a la colada, razón por la que esta última unidad tenga como límite a la falla.

5.5.2 Perfiles geológicos de San Jerónimo Ocotitlán

Unidades geológicas del Perfil I-I'J

En la Figura 5.31 se observa que la unidad geológica que sobreyace en la parte inicial y central de la sección son piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con espesores de 3.5 y 0.8 m y con resistividades de 270 y 250 Ω m respectivamente; mientras que en la parte final de la sección la unidad que se encuentra expuesta son tobas limo arcillosas, con resistividades de 15, 20 y 30 Ω m y con un espesor máximo de 23 m. Subyaciendo a las dos unidades antes mencionadas se encuentra una unidad de tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, con un espesor variable, notando su mayor espesor de 220 m hacia el extremo sur de la sección y con resistividades de 60, 70, 110, 140 y 180 Ω m. Subyaciendo a las dos unidades antes mencionadas se encuentra una unidad de tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, con un espesor variable, notando su mayor espesor de 220 m hacia el extremo sur de la sección y con resistividades de 60, 70, 110, 140 y 180 Ω m.

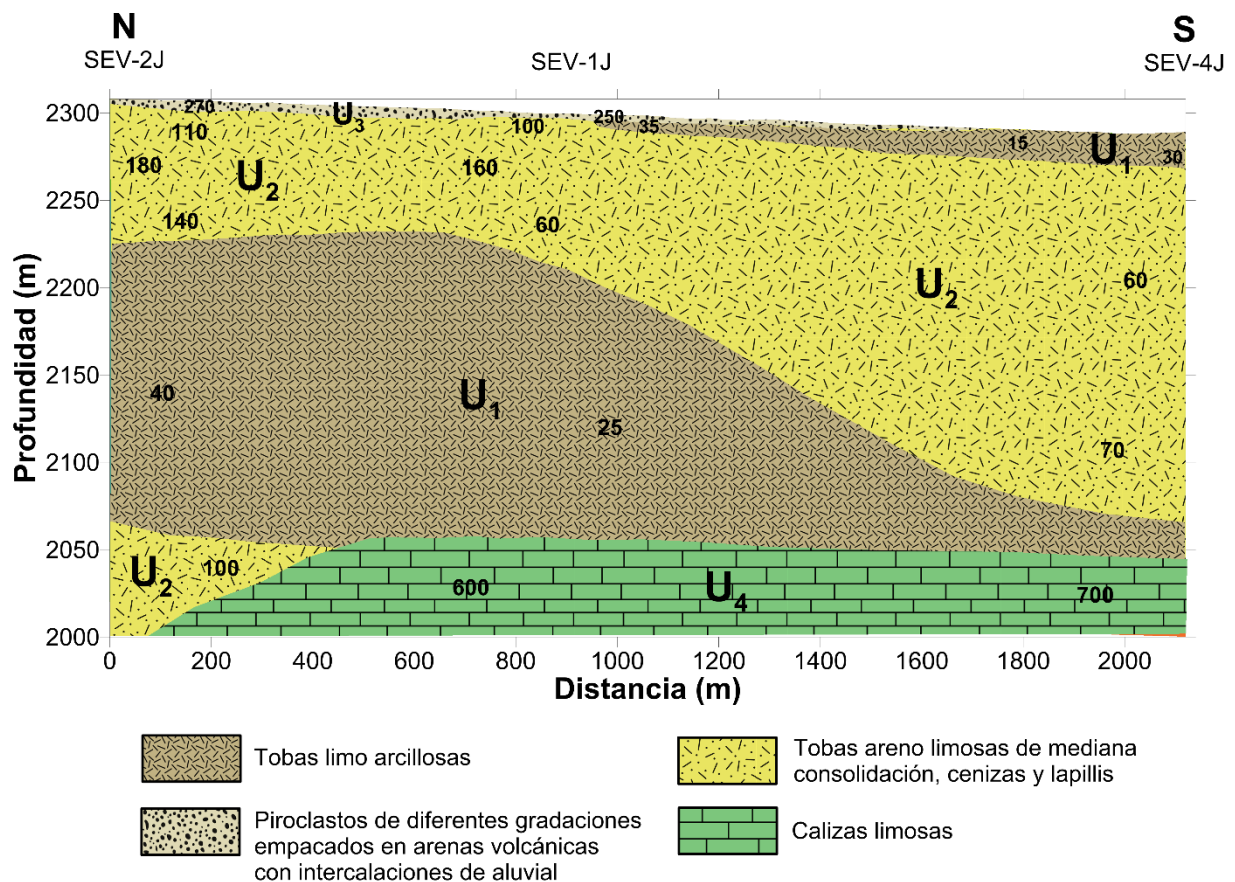


Figura 5.31. Unidades geológicas presentes en el Perfil I-I'J.

A una profundidad de 83 m en la parte inicial y 72 m en la parte central de la sección se encuentra una unidad asociada a tobas limo arcillosas, disminuyendo su espesor hacia la parte final de la sección debido a que su disposición sigue la forma de la topografía. En la parte inferior de la sección a una profundidad de 254 m se presentan unas tobas limo arenosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, la cual se encuentra en contacto discordante con las calizas limosas que están a una profundidad de 242 y 243 m y con resistividades de 600 y 700 Ω m.

Unidades geológicas del Perfil II-II'J

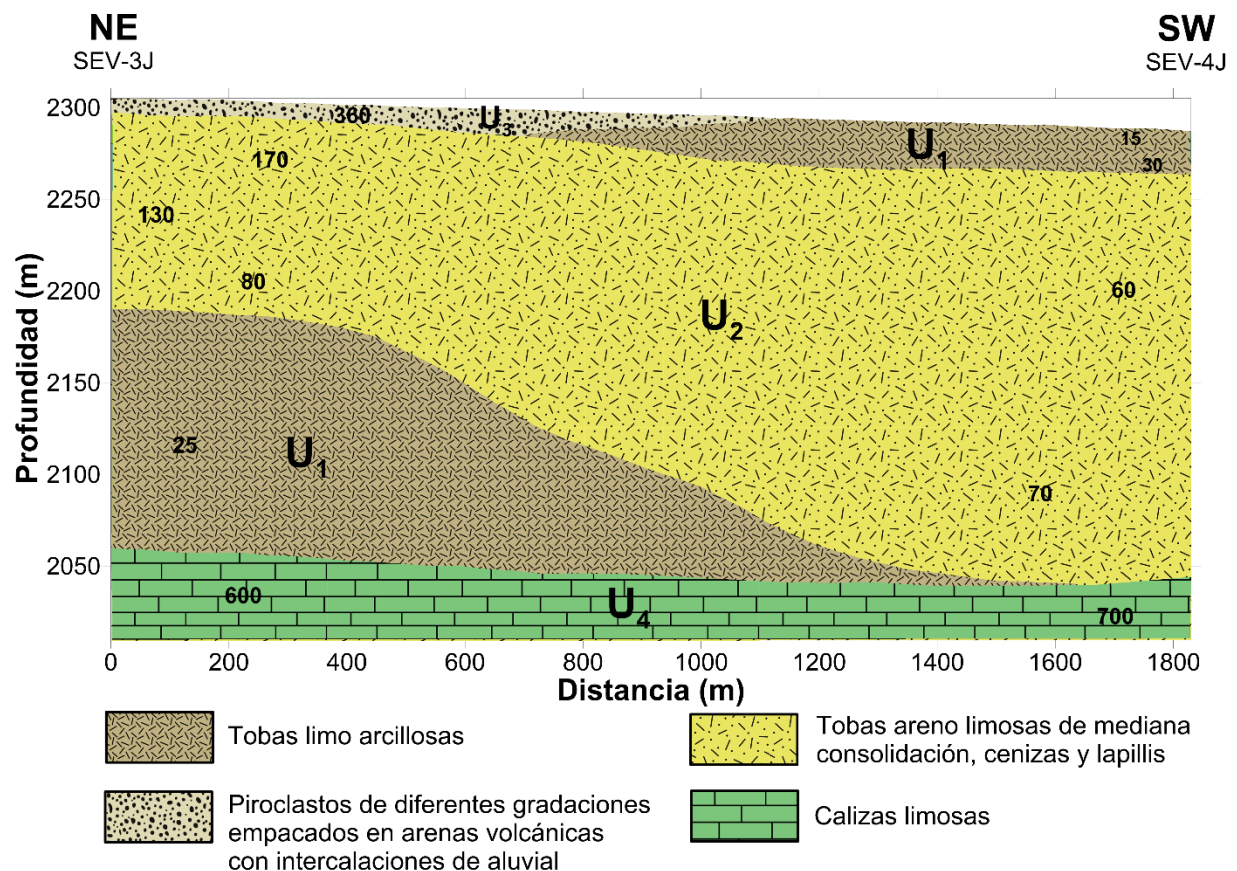


Figura 5.32. Unidades geológicas presentes en el Perfil II-II'J.

En la Figura 5.32 se observa que la unidad que se encuentra expuesta en el extremo NE son piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material

aluvial, con una resistividad de 360 Ω m y un espesor de 1 m; mientras que en la parte final de la sección se encuentran expuestas tobas limo arcillosas con resistividades de 15, 20 y 30 Ω m. Las tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis se hallan subyaciendo a las dos unidades antes mencionadas, su mayor espesor de 220 m se observa en la parte final de la sección y tiene resistividades de 60, 70, 80, 130 y 170 Ω m. A una profundidad de 115 m en la parte inicial de la sección se encuentra una unidad de tobas limo arcillosas, cuyo su espesor disminuye hacia la parte final de la sección debido a que su disposición sigue la tendencia del relieve de la zona de estudio. Subyaciendo a todas las unidades anteriores se presentan las calizas limosas a una profundidad prácticamente constante de 245 y 243 m de la parte inicial a la final de la sección, con resistividades de 600 y 700 Ω m respectivamente.

Unidades geológicas del Perfil III-III'J

En la Figura 5.33 se observa de manera inmediata que la disposición de todas las unidades geológicas presentes en esta sección es semejante a la topografía de la región que la constituyen. La unidad que sobreyace a todas las demás son piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, presentando resistividades de 270 y 360 Ω m y espesores de 3.5 y 1.5 m respectivamente. Subyaciendo a la unidad antes mencionada se encuentran tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, con un espesor variable de 78 m en la parte inicial de la sección y de 112 m hacia el final de la sección. A una profundidad de 83 m en el extremo NW y 115 m en el extremo SE de la sección se encuentran tobas limo arcillosas con un espesor de 170 y 130 m respectivamente. Subyaciendo a todas las unidades geológicas anteriores se presentan dos unidades, en la parte inicial de la sección a una profundidad de 254 m se observan tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis; las cuales están en contacto discordante con las calizas limosas que se hallan a una profundidad de 245 m en la parte final de la sección.

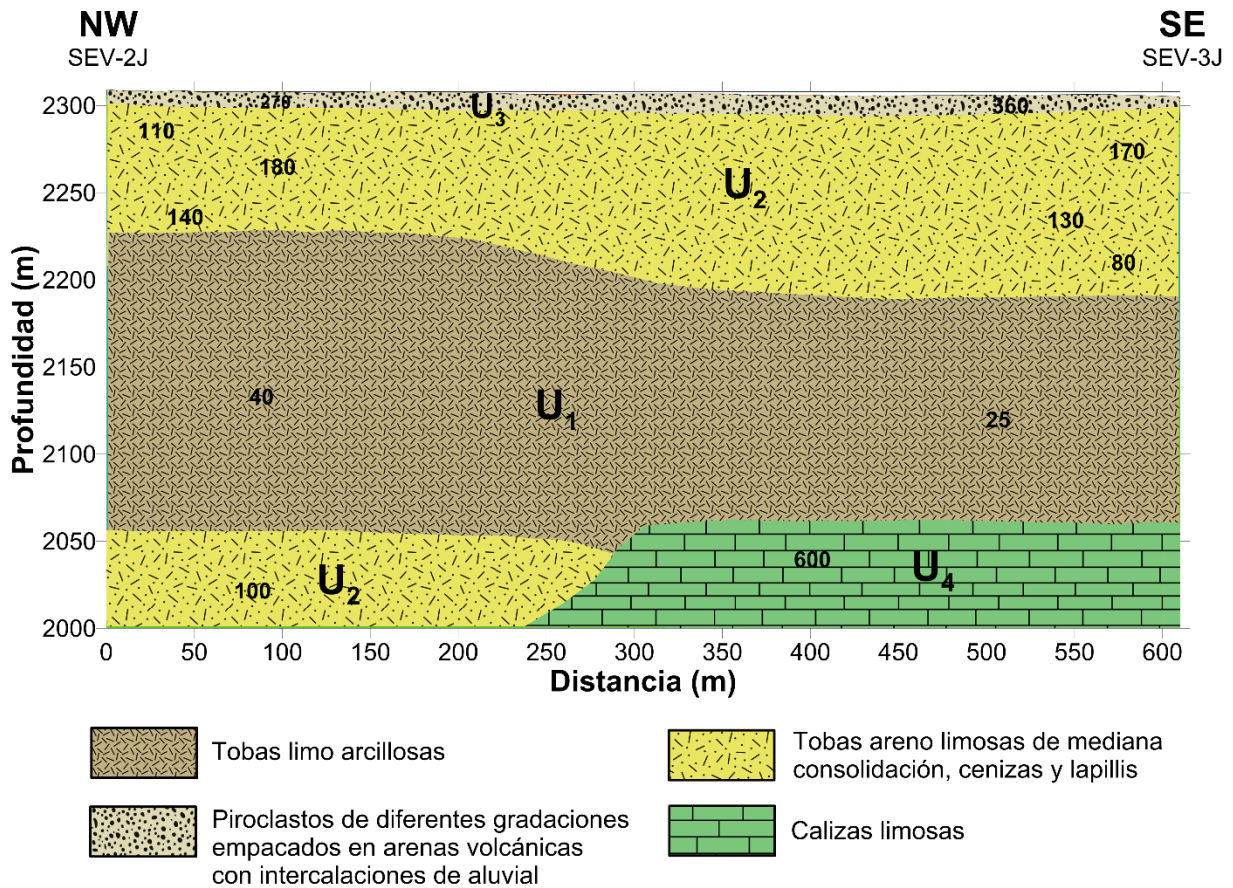


Figura 5.33. Unidades geológicas presentes en el Perfil III-III'J.

Unidades geológicas del Perfil IV-IV'J

En la Figura 5.34 se observa también de forma inmediata que la disposición de las unidades geológicas se encuentra de acuerdo a la topografía de la región. La unidad que está expuesta en la superficie se relaciona con piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con espesores muy delgados de 1.5 y 0.8 m y resistividades de 360 y 250 Ωm respectivamente. Subyaciendo a la unidad antes menciona se hallan tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, la cual presenta un espesor menor hacia la parte final de la sección. Las tobas limo arcillosas se observan a una profundidad de 115 m en el extremo NE y 72 m en el extremo SW, con una resistividad de 25 Ωm a lo largo de toda la sección.

Subyaciendo a todas las unidades anteriores se encuentran las calizas limosas, con una resistividad de 600 Ω m a lo largo de toda la sección.

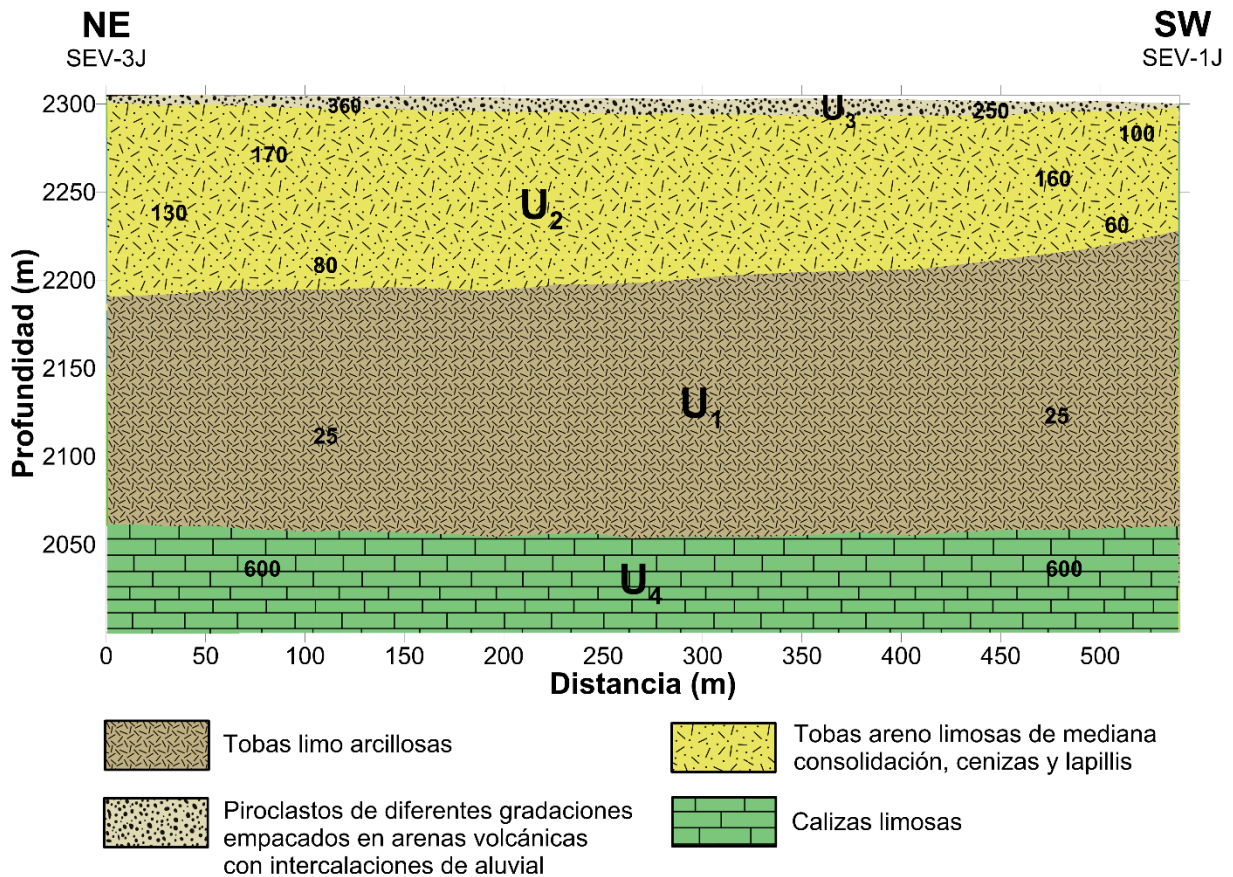


Figura 5.34. Unidades geológicas presentes en el Perfil IV-IV'J.

5.5.3 Correlación de las unidades geológicas entre ambas comunidades

La disposición de las unidades geológicas está en función de la topografía que presente el terreno en donde se están depositando, por lo que las unidades geológicas de este estudio no se encuentran horizontalmente, sino que más bien siguen la inclinación que presentan las faldas inferiores de La Malinche. Además, todas las profundidades que se mencionan a continuación son con respecto a la altitud mayor de este perfil, en este caso el SEV-3T.

En la Figura 5.35 se observa que debajo del SEV-3T se encuentra expuestos piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a

alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con 1 m de espesor y una resistividad de 300 Ω m. Subyaciendo a esta unidad se encuentran tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas, las cuales solamente se observan en esta parte de la sección, debido a la cercanía que posee esta unidad con respecto a la fuente volcánica, causante de estos tipos de material. A una profundidad de 16 m en el extremo N del perfil y con un espesor de 55 m se encuentran piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, los cuales se asociaron con el mismo material que se encuentra expuesto en los SEV-2J y SEV-1J, presentando en esta zona un menor espesor de 3.5 y 0.8 m respectivamente; la variación de espesores para este tipo de materiales aéreos se debe principalmente a la distancia que se encuentren de la fuente de emisión, la duración del evento y la dirección predominante de los vientos.

En el extremo sur de la sección, la unidad que se encuentra expuesta se asocia con tobas limo arcillosas, con un espesor de 23 m, la cual es sobreyacida hacia su extremo izquierdo por los piroclastos antes descritos. En donde se ubica el SEV-3T a una profundidad de 71 m y 144 m en donde se localiza el SEV-4T, con resistividades de 740 y 640 Ω m y espesores de 130 y 95 m respectivamente, se encuentra la unidad asociada a andesitas basálticas fracturadas, cuyo espesor va disminuyendo hacia la parte central de la sección, debido a que la extensión de este material depende en gran medida de la velocidad y volumen de la colada; además el origen de esta colada fue posterior al desarrollo de la falla, por ello su continuidad hacia la parte central del perfil. En donde está ubicado el SEV-4T, a una profundidad de 104 m y con un espesor de 40 m, se halla la unidad de tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, la cual se asoció con la unidad de tobas areno limosas de mediana consolidación que se encuentra hacia la parte final de la sección cuyo espesor es de 70 m. Las tobas limo arcillosas se observan hacia la parte final de la sección a una profundidad de 290 m y 287 m, en donde se ubica el SEV-2J y el SEV-1J respectivamente; además esta unidad se prolongó hacia la parte central de la sección para darle una mejor forma (Figura 5.35).

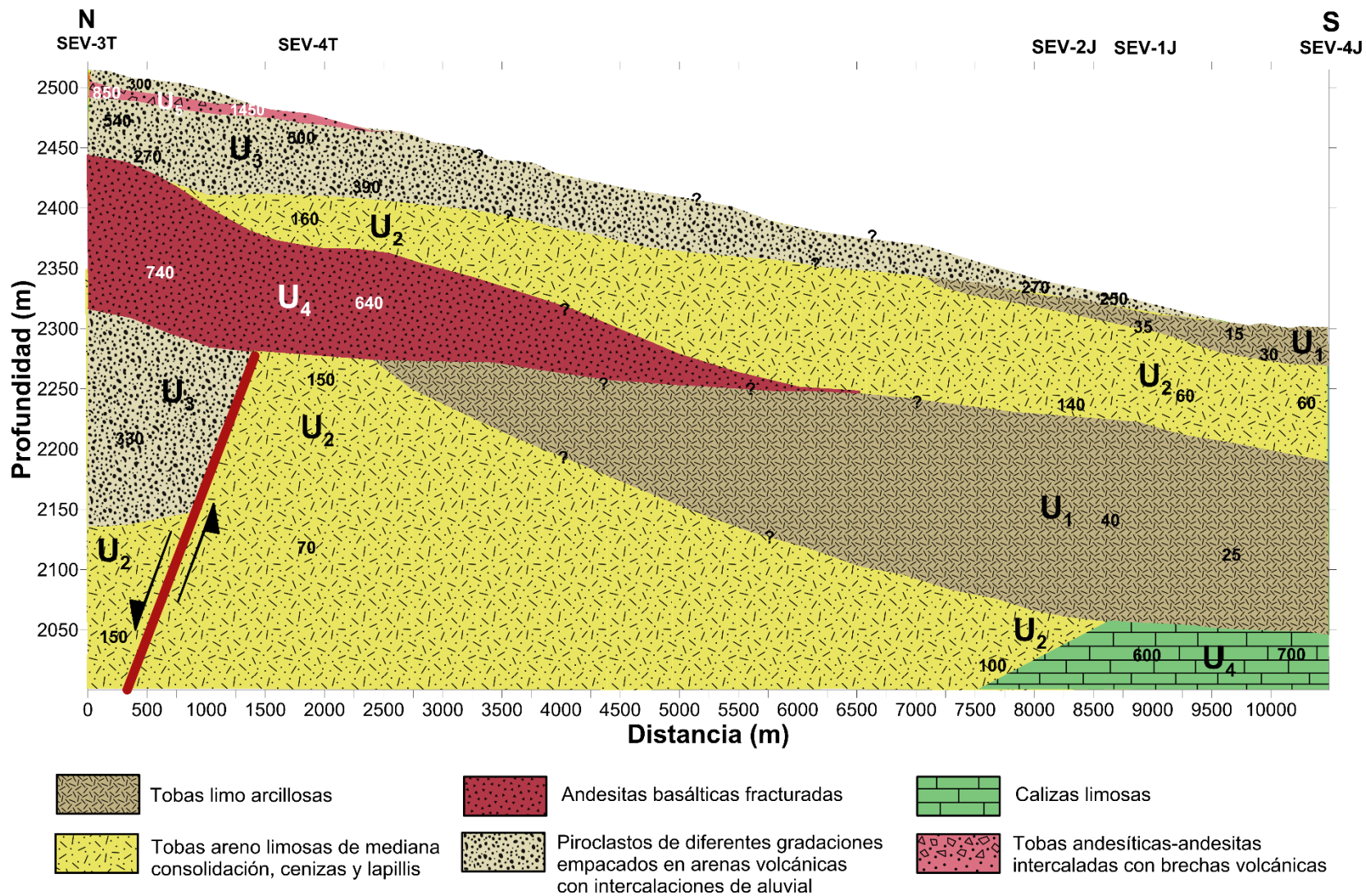


Figura 5.35. Unidades geológicas presentes en el Perfil A-A'.

Entre los sondeos SEV-3T y el SEV-4T se observa la falla sinsedimentaria inversa en la parte inferior de la sección, afectando a la unidad de tobas areno limosas de mediana consolidación con cenizas y lapillis, causando que el bloque que se encuentra hacia la derecha de la falla ascendiera hasta una profundidad de 239 m y que el bloque ubicado a la izquierda de la falla descendiera a una profundidad de 381 m; lo que a su vez provocó la formación de un escarpe, el cual fue rellenado por piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas de mediana a alta consolidación, lo que explica la discordancia de su disposición con las otras unidades. Esta unidad de tobas areno limosas se relacionó con la unidad de tobas areno limosas que se encuentran a una profundidad de 461 m en la parte inferior de donde se ubica el SEV-2J, la cual se encuentra en contacto discordante con las calizas limosas.

Capítulo 6
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En base a los datos de resistividad obtenidos y a las observaciones hechas en campo, el tratamiento de los datos con softwares especializados (IPI2Win y Surfer®) y el conocimiento de la geología de la zona de estudio, se comprobó la naturaleza de las unidades geológicas, la cual corresponde a una alternancia de eventos ígneos resultado de los procesos eruptivos de un estrato volcán, así como también se comprobó que la base en la cual se encuentran depositados estos materiales son calizas, que probablemente corresponden a la Formación Maltrata, de edad cretácica que afloran ampliamente en la Sierra de Amozoc. Asimismo, se observa que la disposición de las unidades geológicas de las secciones pertenecientes a la comunidad de San Juan Tepulco poseen una cierta inclinación guardando la tendencia regional de la zona, ya que estos sondeos se ubicaron en las laderas inferiores de La Malinche; mientras que en San Jerónimo Ocotitlán la disposición de las unidades geológicas presentan una tendencia más horizontal, ya que la influencia en este caso de las laderas del volcán es mucho menor.

De acuerdo a la interpretación de los valores de resistividades, espesores y profundidades observados en los cortes geoeléctricos, se propuso una categorización de estas, obteniendo cinco rangos de resistividades (Tabla 5.2), que posteriormente constituyeron la base para proponer las unidades geológicas, las cuales están fundamentadas en la geología local observada durante la obtención de los datos, así como de la geología regional analizada en las cartas geológicas de INEGI y del SGM. Obteniendo las siguientes unidades:

- La U_1 con resistividades de 15-40 Ω m, geológicamente se asoció con tobas limo arcillosas, se le considera de baja permeabilidad. Además, esta unidad únicamente se presenta en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, región en donde la pendiente comienza a disminuir y por tanto se depositan los materiales resultado de la descomposición de las rocas que se encuentra expuestas a lo largo de las laderas de La Malinche y de los cerros adyacentes.

- La U₂ con resistividades de 60-220 Ωm , geológicamente se asoció con tobas areno limosas de mediana consolidación, cenizas y lapillis, se le considera de mediana permeabilidad.
- La U₃ con resistividades de 230-540 Ωm , geológicamente se relacionó con piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, se le considera permeable.
- La U₄ con resistividades de 600-740 Ωm , geológicamente para la comunidad de San Juan Tepulco se asoció con andesitas basálticas fracturadas (U_{4a}), se le considera de mediana permeabilidad; mientras que en San Jerónimo Ocotitlán esta resistividad se asoció con calizas limosas (U_{4b}), se considera de baja a mediana permeabilidad.
- La U₅ con resistividades de 800-2200 Ωm , geológicamente se asoció con tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas, se le considera de baja a mediana permeabilidad. Esta unidad no se presenta en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, debido a la distancia en que se encuentra la comunidad con respecto a la fuente de emisión.

Al realizar las secciones geoelectricas de la comunidad de San Juan Tepulco se infirió la existencia de una falla, determinando su existencia al llevar a cabo la interpretación de las secciones geológicas; ya que se observa que las unidades litológicas tienen una desaparición brusca lateralmente. Esta falla es conocida como sinsedimentaria y es de tipo inversa, encontrándose en la parte inferior de los Perfiles I-I'T, II-II'T, IV-IV'T, V-V'T, VI-VI'T, los cuales presentan una orientación NNW-SSE, NW-SE, W-E, N-S y NW-SE respectivamente. Probablemente en el Perfil III-III'T no se observa la falla debido a que su orientación es NE-SW, la cual coincide con la orientación de la misma falla. El desarrollo de esta falla probablemente se deba a un evento más regional el cual dio origen al Graben de Puebla, sobre el cual se encuentra La Malinche y además fue contemporáneo a la depositación de las tobas areno limosas, esta falla actualmente no se encuentra activa, ya que no se manifiesta en superficie.

En San Juan Tepulco de manera general se observa que, de las seis secciones geológicas las tobas limo arcillosas no se presentan. Las tobas areno limosas de mediana consolidación, cenizas y lapillis se hallan en la parte inferior de todas las secciones; así como también a una profundidad de 21 y 48 m debajo de los sondeos SEV-5T y el SEV-4T respectivamente, en horizontes con espesores de 25 y 40 m en los perfiles I-I'T, II-II'T, III-III'T y V-V'T. Los piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial se presentan tanto en la superficie con espesores no mayores a 5 m, así como en la parte media de las secciones a profundidades de 17, 50 y 200 m. Las andesitas basálticas fracturadas se encuentran a profundidades de 70 y 88 m con espesores de 95, 115 y 130 m; sin embargo, en las secciones I-I'T, III-III'T y VI-VI'T se presenta solamente en un extremo de las secciones. Las tobas andesíticas-andesitas intercaladas con brechas volcánicas se observan a lo largo de la parte superior de todas las secciones con espesores delgados, regularmente de 1 a 10 m.

En San Jerónimo Ocotitlán de manera general se observa que en las cuatro secciones geológicas no se presentan las tobas andesíticas y andesitas intercaladas con brechas volcánicas. En la parte superior de todas las secciones se observan piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, con espesores muy delgados, siendo su máximo de 3.5 m. Las tobas areno limosas de mediana consolidación se hallan subyaciendo a los piroclastos; asimismo en los perfiles I-I'J y III-III'J se encuentran dichas tobas en la parte inferior de la parte inicial de estos, en contacto discordante con las calizas limosas. Las tobas limo arcillosas se presentan subyaciendo a las tobas areno limosas de mediana consolidación en todas las secciones, así como también en el extremo final de las secciones I-I'J y II-II'J a una profundidad no mayor a 3 m. La caliza limosa se encuentra subyaciendo a todas las otras unidades geológicas, formando la base de todas las unidades litológicas descritas; además se presenta a profundidades muy parecidas de 242, 243 y 245 m, y debido a que esta unidad está conformada por las últimas capas exploradas no se conoce su espesor real.

Para confirmar el objetivo de si existe o no correlación entre las unidades geológicas de ambas comunidades se construyó el Perfil A-A', el cual está conformado por los perfiles V-V'T y el I-I'J, que a su vez están integrados por los sondeos SEV-3T, SEV-4T, SEV-2J, SEV-1J y el SEV-4J. La correlación de las unidades geoeléctricas en este perfil permitió notar que la U₄ (600 a 740 Ωm) representa una litología diferente para cada comunidad, en San Juan Tepulco se asoció a andesitas basálticas fracturadas (U_{4a}), mientras que en San Jerónimo Ocotitlán se asoció a calizas limosas (U_{4b}). Al realizar la sección geológica del Perfil A-A' también se correlacionaron dos unidades: la de piroclastos de diferentes gradaciones empacados en arenas volcánicas de mediana a alta consolidación con algunas intercalaciones de material aluvial, expuesto en la parte superior de la sección y la de tobas areno limosas de mediana consolidación, cenizas y lapillis, esta última se correlacionó dos veces.

Tomando en cuenta las características geoeléctricas y geológicas que presenta cada unidad geológica por debajo de los nueve sondeos, así como su capacidad de permeabilidad se determinó que el sondeo SEV-5T ubicado en San Juan Tepulco presenta las mejores condiciones para el alumbramiento de agua subterránea a una profundidad de 250 m (Figura 6.1), en tanto que el SEV-4J ubicado en San Jerónimo Ocotitlán se propone a una profundidad de exploración de 150 m (Figura 6.2). Además, desde un punto de vista hidrogeológico las rocas vulcanoclásticas en el área de estudio pueden formar acuíferos de tipo granular restringidos a su extensión y espesor, dando como resultado rendimientos bajos a medios en los pozos profundos de esta región, principalmente los ubicados en la comunidad de San Juan Tepulco.

En la Figura 6.1 se observa el SEV-5T en el corte geoeléctrico del Perfil I-I'T, en donde la resistividad de 120 Ωm con un espesor de 230 m y a una profundidad de 126 m es la capa que presenta las mejores condiciones para el alumbramiento de agua en la comunidad de San Juan Tepulco, punto en donde se propone que se realice el pozo profundo con una profundidad de 250 m. Geoeléctricamente los valores que se asociaron con la zona saturada de agua subterránea oscila entre 70 a 150 Ωm; esta región se rencuentra delimita por la línea punteada en la Figura 6.1.

Geológicamente los valores comprendidos por la línea punteada corresponden a la misma unidad geológica, que son tobas areno limosas de mediana consolidación.

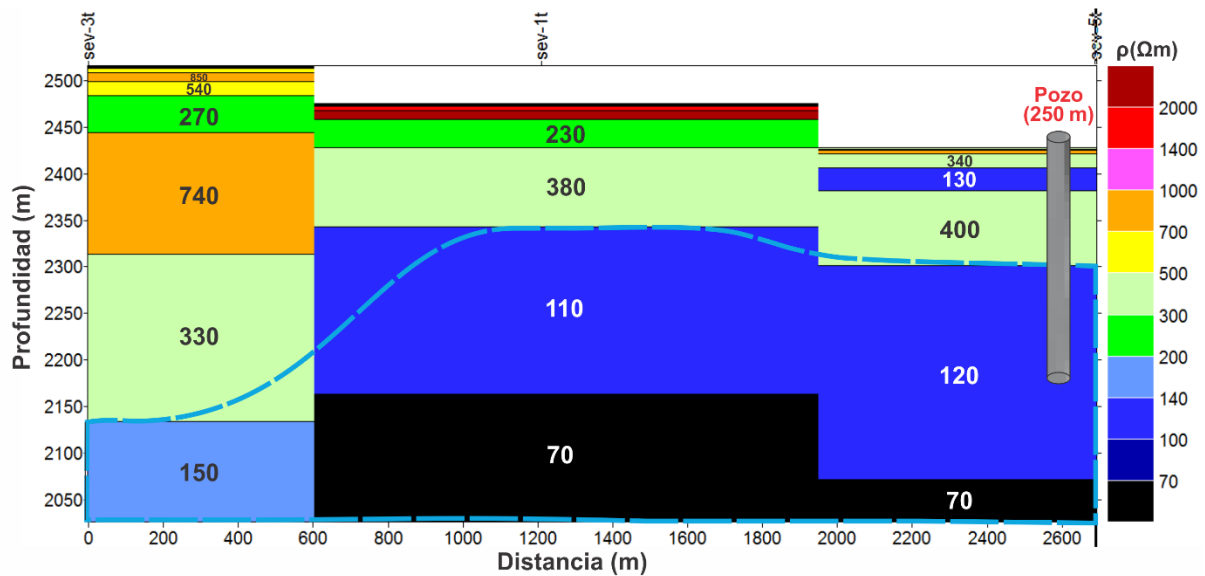


Figura 6.1. Zona saturada de agua delimitada por la línea punteada en la comunidad de San Juan Tepulco, así como la profundidad propuesta a la que debería realizarse el pozo profundo en esta comunidad.

En la Figura 6.2 se observa el SEV-4J en el corte geoelectrico del Perfil II-II'J, en donde la resistividad de 70 Ωm con un espesor de 150 m y a una profundidad de 93 m es la capa que presenta las mejores condiciones para el alumbramiento de agua en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, sitio en donde se propone que se llegue la perforación del pozo profundo con una profundidad de 150 m. Geoelectricamente los valores que se asociaron con la zona saturada de agua subterránea oscila entre 60 a 80 Ωm, estos valores se encuentran delimitados por la línea punteada. La capa impermeable oscila entre los 600 y 700 Ωm; así como también se observa un valor de 25 Ωm que se encuentra únicamente en la parte inicial de la sección.

Geológicamente los valores comprendidos por la línea azul punteada corresponden a tobas areno limosas de mediana consolidación. La capa impermeable está representada por calizas limosas, así como también por tobas limo arcillosas, que debido al contenido de arcillas y limos dan como resultado una baja permeabilidad, por ello que se consideren como la capa impermeable.

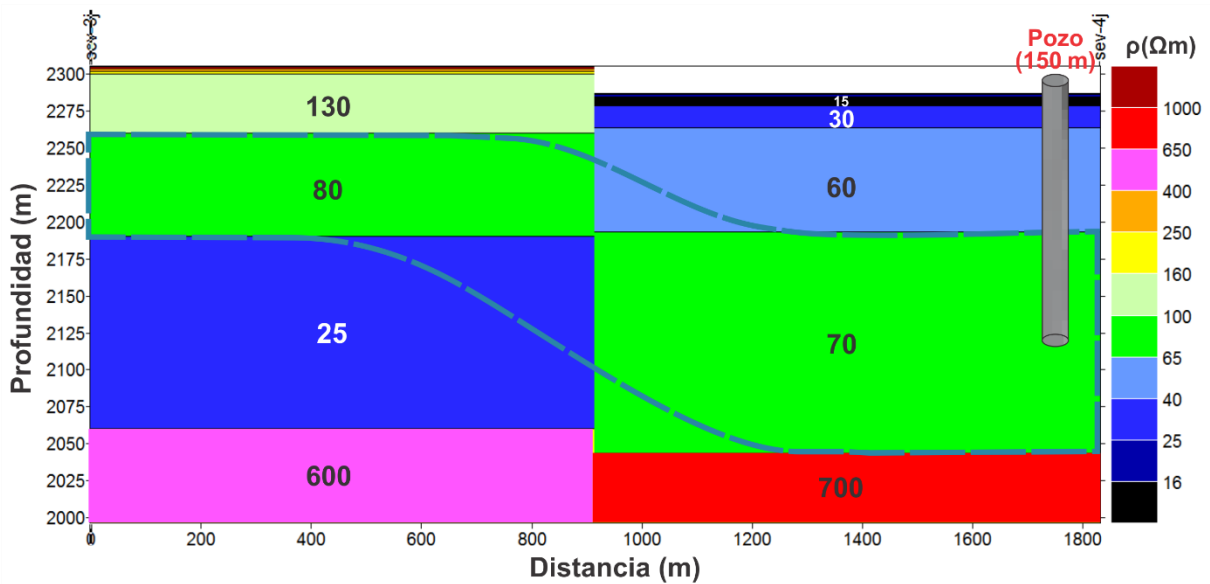


Figura 6.2. Zona saturada de agua delimitada por la línea punteada en la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, así como la profundidad propuesta a la que debería realizarse el pozo profundo en esta comunidad.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda que los sitios que obtuvieron los mejores resultados en los sondeos eléctricos verticales sean respetados, así como también la profundidad de exploración, para obtener las mejores posibilidades de alumbramiento de agua. Asimismo, se recomienda que la maquinaria de perforación sea de tipo rotatoria para que esta tenga un avance efectivo.

Se recomienda también que en el proceso constructivo de los pozos profundos sean supervisados por personal calificado en este tipo de obras, para que se pudieran resolver de una manera eficaz cualquier problema que se presentará.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

Arreguín, F. (2011). *El Agua Subterránea en México*. Simposio: Las Ciencias de la Tierra en el estudio del Agua Subterránea. Comisión Nacional del Agua. México.

Carrasco-Núñez, G., Macías, J. L., & Capra, L. (2010). *Algunas Contribuciones a la Evaluación de los Peligros Volcánicos en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. México.

Castañeada, A. D. (2011). *Impacto del Cambio Climático en las Comunidades Vegetales del Parque Nacional Malinche, Tlaxcala, México*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México.

Castro-Govea, R. (1999). *Historia eruptiva reciente del volcán La Malinche*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. México. Recuperado de: <http://132.248.9.195/pd1999/270474/Index.html>

Castro-Govea, R., & Siebe, C. (2007). *Late Pleistocene-Holocene stratigraphy and radiocarbon dating of La Malinche volcano, Central Mexico*. Universidad Nacional Autónoma de México. Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica. México.

Castro-Govea, R., & Siebe, C. (2009). *La historia eruptiva de la Malinche*. El Colegio de Tlaxcala, CONACYT, Mesoamerican Research Foundation. *Matlalcuéytl: visiones plurales sobre cultura, ambiente y desarrollo*. Tomo I, p. 75-107.

Comisión Estatal de Agua de Guanajuato. (2001). *Términos de Referencia para "Elaborar Estudios Geofísicos-Geohidrológicos"*. México.

Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Prospección Geoeléctrica y Registros Geofísicos de Pozos*. México.

Comisión Nacional del Agua. (2009). *Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Tecamachalco, Estado de Puebla*. Gerencia de Aguas Subterráneas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Comisión Nacional del Agua. (2010). *Estadísticas del Agua en la cuenca del Río Balsas, 2010*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Comisión Nacional del Agua. (2013). *Atlas del agua en México 2013*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Comisión Nacional del Agua. (2013). *Estadísticas del Agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Demant, A. (1978). *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Geología, Revista, Vol. 2, Núm. 2, p. 172-187.

Demant, A. (1979). *Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Geología, Revista, vol. 3, núm. 1, p. 39-57.

Ferrari, L. (2000). *Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, V. LIII, p. 84-92.

García, H. E., & Loreto, L. R. (2009). Topografía, geología y clima en la cuenca del Alto Atoyac. Factores determinantes del funcionamiento de los sistemas de flujo agua subterránea. *Agua, poder urbano y metabolismo social*. Puebla, México: Tigraf, S.A. de C.V.

Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática y Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. (1980). *Geología de la República Mexicana*. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2008). *Manual. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADAMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Acajete, Puebla*. México.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. (3ra Ed.). Estados Unidos de América: Blackwell Science Ltd.

Kirsch, R., & Ernstson, K. (2009). Geoelectrical methods. *Groundwater Geophysics. A tool for Hydrogeology*. (2da Ed.). Alemania: Springer-Verlang Berlín Heidelberg.

Lermo-Samaniego, J., & Bernal-Esquia, I. (2006). *Zonificación sísmica del Estado de Tlaxcala, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo 58, Núm. 2, p 215-211.

Llaguno, M. J., Torres, T. E., & Valera, P. M. (2007). *El clima y el futuro del recurso agua en la microrregión de La Malinche*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México

López-Domínguez, J. C., & Acosta, P. R. (2004). *Descripción de Parque Nacional Malinche*. México.

López-Loera, H. (2014). *Geofísica para la localización de Agua Subterránea en Ambientes Volcánicos Áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 66, Núm. 1, p. 165-181. México.

Lugo-Hubp, J. (1990). *El Relieve de la República Mexicana*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Geología, Revista, Vol. 9, Núm. 1, p. 82-111.

Medina, C. A., Salazar, C. T., & Álvarez, P. J. (s.f.). *Fisiografía y suelos*. México. Recuperado de:
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/9647/1/01FISIOGRAFIAAUTORES.pdf>

Milsom, J. (2003). *Field Geophysics. The Geological Field Guide Series*. (3ra Ed.). Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.

Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. (2da Ed.) Madrid, España: Paraninfo.

Parasnis, D. S. (1970). *Principios de geofísica aplicada*. Madrid, España: Paraninfo.

Reynolds, J. M. (1998). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.

Rodríguez, E. S., & Morales, B. W. (s.f.). *Geología*. México. Recuperado de:
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/9647/1/01FISIOGRAFIAAUTORES.pdf>

Rosete, F., & Bocco, G. (1999). *Ordenamiento territorial. Bases conceptuales y estrategias de aplicación en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012*. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Programa de Manejo. Parque Nacional La Montaña La Malinche o Matlalcuéyatl*. México.

Servicio Geológico Mexicano. (2013). *Panorama Minero del Estado de Puebla*. Secretaría de Economía. México.

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. (2014). *Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidades. Geohidrología*. México.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (2004). *Applied Geophysics*. (2da Ed.) Nueva York, Estados Unidos de América: University of Cambridge.

Villers, R. L., Rojas, G. F., & Tenorio, L. P. (2006). *Guía botánica del Parque Nacional Malinche Puebla-Tlaxcala*. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Biología. México.

Páginas de internet

Recuperado de: <http://www.coteigep.puebla.gob.mx/est231.php?muni=21001#inicio>

Recuperado de: http://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/default.html

Recuperado de: <http://mapasims.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

Recuperado de: <http://pueblaonline.com.mx/portal/index.php/estado/item/12845-conflicto-entre-ediles-de-amozoc-y-tepatlaxco-por-reparto-del-agua-potable>

Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/>

Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/>

Recuperado de: <http://www.oem.com.mx/elsoldepuebla/notas/n3542553.htm>

ANEXOS

Memoria fotográfica

Ubicación de los sondeos en San Juan Tepulco

- **SEV-1T**, se localizó a 100 metros al SW 60° de la antigua estación de ferrocarril de Acajete (Fotografías 1 a 4). Sus coordenadas geográficas son: 19° 06' 22.14" latitud norte y 97° 57' 33.12" longitud oeste con una elevación de 2 475 m.s.n.m.



Fotografía No.1



Fotografía No.2



Fotografía No.3



Fotografía No.4

- **SEV-2T**, se ubicó al lado poniente de la clínica de salud de la comunidad San Juan Tepulco (Fotografías No. 5 a 8). Sus coordenadas geográficas son: 19° 06' 53.64" latitud norte y 97° 58' 58.02" longitud oeste con una elevación de 2 560 m.s.n.m.



Fotografía No.5



Fotografía No.6



Fotografía No.7



Fotografía No.8

- **SEV-3T**, se localizó aproximadamente a 1 980 metros al NE 85° del SEV-1T, en la propiedad del Sr. Jorge Salazar Chico (Fotografías No. 9 a 12). Sus coordenadas geográficas son: 19° 06' 59.46" latitud norte y 97° 57' 50.64" longitud oeste con una elevación de 2 515 m.s.n.m.



Fotografía No.9



Fotografía No.10



Fotografía No.11



Fotografía No.12

- **SEV-4T**, se ubicó aproximadamente a 650 metros al SW 28° del SEV-1T en el sitio conocido como barranca “El Bolero” (Fotografías No. 13 a 16). Sus coordenadas geográficas son: 19° 06' 3.42" latitud norte y 97° 57' 43.92" longitud oeste, con una elevación de 2 459 m.s.n.m.



Fotografía No.13



Fotografía No.14



Fotografía No.15



Fotografía No.16

- **SEV-5T**, se ubicó dentro de los terrenos de la Escuela Preparatoria Cardenista, ubicada aproximadamente a 1 000 metros al SE 17° de la Presidencia Municipal de Acajete (Fotografías No. 17 a 20). Sus coordenadas geográficas son: 19° 05' 47.34" latitud norte y 97° 56' 58.44" longitud oeste, con una elevación de 2 428 m.s.n.m.



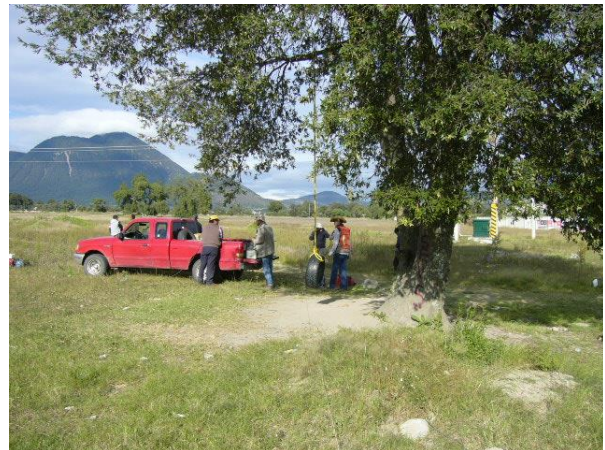
Fotografía No.17



Fotografía No.18



Fotografía No.19



Fotografía No.20

Ubicación de los sondeos en San Jerónimo Ocotitlán

- **SEV-1J**, se localizó aproximadamente a 460 metros al N 18° W de la Iglesia de la comunidad de San Jerónimo Ocotitlán, en terrenos de la Sra. Olaya Hernández Méndez (Fotografías No. 21 a 24). Sus coordenadas geográficas son: 19° 02' 9.50" latitud norte y 97° 57' 52.90" longitud oeste con una altitud de 2 300 m.s.n.m.



Fotografía No.21



Fotografía No.22



Fotografía No.23



Fotografía No.24

- **SEV-2J**, se localizó aproximadamente a 550 metros al norte del SEV-1J, en terrenos del Sr. Pascual Flores Medina, en el área conocida como Tlalcoxpa (Fotografías No. 21 a 24). Las coordenadas geográficas obtenidas son: 19° 02' 27.30" latitud norte y 97° 57' 52.20" longitud oeste con 2 308 m.s.n.m de altitud.



Fotografía No.21



Fotografía No.22



Fotografía No.23



Fotografía No.24

- **SEV-3J**, se localizó aproximadamente a 600 metros al S 53° E del SEV-2J en terrenos propiedad de la Sra. Francisca Hernández Méndez, en el sitio conocido como Santa Ana (Fotografías No. 25 a 28). Las coordenadas geográficas obtenidas son: 19° 02' 15.50" latitud norte y 97° 57' 35.60" longitud oeste con una altitud de 2 305 m.s.n.m.



Fotografía No.25



Fotografía No.26



Fotografía No.27



Fotografía No.28

- **SEV-4J**, se localizó aproximadamente a 335 metros al S 12° E del Pozo Bachilleres en terrenos del Campo Deportivo de la comunidad (Fotografías No. 29 a 32). Las coordenadas geográficas obtenidas son: 19° 01' 18.40" latitud norte y 97° 57' 53.40" longitud oeste con una altitud de 2 287 m.s.n.m.



Fotografía No.29



Fotografía No.30



Fotografía No.31



Fotografía No.32



Fotografía No. 33. Pozo del Parque cuyas coordenadas geográficas son: 19° 01' 42.1" latitud norte y 97° 57' 58.60" longitud oeste, con una altitud de 2 296 m.s.n.m.



Fotografía No. 34. Pozo Bachilleres cuyas coordenadas geográficas son: 19° 01' 44.1" de latitud norte y 97° 57' 58.60" de longitud oeste, con una altitud de 2 299 m.s.n.m.