



**BUAP**

# **BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES, EN LA LOCALIDAD  
DE SANTA MARÍA, SAN PEDRO HUAMELULA, OAXACA PARA  
FINES GEOHIDROLÓGICOS”**

# **TESIS**

Que para obtener el título de:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA GEOFÍSICA**

presenta:

**ALAN ENRIQUE MENA HERNÁNDEZ**

Director interno de tesis:

**M.C. JOSÉ SERRANO ORTIZ**

Director externo de tesis

**M.C. VALDEMAR BELMONTE GARCÍA**

**Puebla, Puebla, Febrero 2020**



## RESUMEN

En este trabajo se exponen los resultados obtenidos de un estudio geoelectrico orientado a la ubicacion de agua subterranea en la localidad de Santa Maria, perteneciente al municipio de San Pedro Huamelula en el estado de Oaxaca.

El estudio consistió en realizar 4 Sondeos Eléctricos Verticales por sus siglas (SEV's) con el objetivo de proponer la profundidad de la o las capas en el subsuelo con posibilidades de almacenar y transmitir el vital recurso como es el agua para satisfacer las carencias de ésta en la mencionada localidad.

Los 4 SEV's tuvieron configuración electrónica Schlumberger y las aberturas fueron variables, desde  $AB/2=150m$ , hasta  $AB/2=250m$  debido a las condiciones topográficas y restricción en el acceso.

Para el procesamiento de los datos de resistividad fue utilizado el software ZONDIP1D, con el cual se realizó modelado directo de cada SEV y nos generó un modelo de capas en 1D para cada uno, así como una sección de resistividad bidimensional a partir de la interpolación de los 4 SEV's, con la cual se puede ver la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo. Los resultados se correlacionaron con la información geológica e hidrológica disponible para generar una sección geológica que representa las características del subsuelo y así se propuso el sitio óptimo para la perforación exploratoria.

El modelo geológico conformado por los SEV's 2-3-4 señala que el sitio óptimo para una perforación exploratoria corresponde al SEV-4 a una profundidad de 70 metros.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis especialmente a mi Madre que ah sido el pilar y el sostén para concluir mis estudios universitarios.

Dedico y Agradezco a mi asesor: M.C Valdemar Belmonte García, que me instruyó, apoyó en este proyecto de tesis y durante los estudios de campo en Oaxaca, A BELMONTE A.C Servicios Geofísicos-Hidrogeológicos- Ambientales y a todo el equipo que lo conforman y agradezco por la oportunidad.

Dedico también por su apoyo, consejos, opiniones y comentarios a un amigo, el Ing. Gerardo Gómez Vergara.

Dedico este trabajo a mis maestros de la carrera y comité de evaluación de este trabajo a los maestros M.C José Serrano Ortiz, M.C Julio González Hernández y el Ing. Manuel Uribe Arreaga.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a mi madre Irlanda Hernández Martin y a toda mi familia, por todo su apoyo y buenos consejos.

Agradezco a mi asesor interno y amigo, el M.C José serrano Ortiz, por apoyarme en el proyecto de tesis, gracias por sus consejos, opiniones y comentarios que fueron fundamentales para el proyecto.

Dedico y agradezco a Karla Andrade por toda la propulsión durante este trabajo de tesis, a mis amigos de Cd del Carmen (Andrea, Lupita, Vivi, Choco, Erick, Diego, Abraham, Campi, Domit y Gibran, Morgan y Chepe), amigos que conocí en la universidad (Karla, Ale, Karina y Magia; Héctor, Albérico, Silverio, Edgar (chato), Rafa, Oliver, Jaque, Mirna y Alexa).

A:

*Lex y Napo*

## ÍNDICE

Resumen.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iii
Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas.....	viii
Capítulo 1.....	2
Introducción.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivo general.....	3
1.4 Objetivos particulares.....	4
1.5 Antecedentes.....	4
Capítulo 2 - Marco Geológico e hidrológico.....	5
2.1 Localización de la zona de estudio.....	5
2.2 Localización del estudio Geoeléctrico.....	7
2.3 Generalidades de la zona de estudio.....	8
2.4 Fisiografía de la zona de estudio.....	9
2.5 Estratigrafía Sierra Madre del Sur.....	12
2.6 Geología Local.....	12
2.7 Terrenos tectonoestratigráficos y principales fallas correspondientes a la región de Santa María, San Pedro Huamelula, Oaxaca.....	14
2.7.1 Terreno Chantino.....	14
2.7.2 Falla Chacalapa.....	15
2.8 Marco hidrológico.....	16
2.8.1 Disponibilidad del acuífero Santiago Astata.....	17
2.8.2 Geología del acuífero.....	19
Capítulo 3 – Marco teórico.....	22
3.1 Teoría de la prospección geoeléctrica.....	22

3.2 Resistividad eléctrica.....	23
3.3 Ecuaciones gobernantes del método de prospección Geoeléctrica.....	26
3.4 Resistividad Aparente.....	28
3.5 Sondeos eléctricos verticales.....	29
3.5.1 Dispositivo Schlumberger. ....	30
3.6 Factor Geométrico. ....	32
3.7 Empalme.....	33
3.8 Ventajas y desventajas del arreglo Schlumberger.....	33
3.9 Corte Geoeléctrico.....	33
Capítulo 4 - Metodología .....	37
4.1 Instrumentación Geofísica.....	37
4.2 Adquisición de datos de campo.....	39
4.3 Procesamiento de datos geofísicos (Software). ....	41
Capítulo 5 – Resultados e interpretaciones .....	43
5.1 Modelo de capas.....	43
5.2 Pseudosección de resistividad.....	54
5.3 Sección de resistividad.....	55
5.4 Modelos geológicos.....	57
Capítulo 6 - Conclusiones y Recomendaciones .....	59
6.1 Conclusiones .....	59
6.2 Recomendaciones .....	60
Referencias y Bibliografía.....	61
Anexos I.- Registro geofísico de pozo.....	64
Anexo II.- Memoria fotográfica.....	65
Anexo III.- Tabulación de datos de resistividad tomados en campo.....	67

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- IMÁGENES DE LOS POZOS CERCANOS A LOS PUNTOS DONDE SE REALIZARON LOS SEV'S, EL SUPERIOR TIENE UNA PROFUNDIDAD DE 35 METROS, Y EL INFERIOR TIENE UNA PROFUNDIDAD DE 10 METROS).....	5
FIGURA 2.- CON UN POLÍGONO ROJO SE SEÑALA LA EXTENSIÓN DEL MUNICIPIO DE SAN PEDRO HUAMELULA, CON UN CÍRCULO NEGRO SE SEÑALA LA ZONA EXPLORADA PERTENECIENTE A LA COMUNIDAD DE SANTA MARÍA. (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN METADATOS DE INEGI) .....	6
FIGURA 3.-UBICACIÓN DELIMITADA DE LOS 4 SITIOS DONDE SE EFECTUARON LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV's), CON LAS SIGLAS SEV-1, SEV-2, SEV-3 Y SEV-4 EN LA LOCALIDAD DE SANTA MARÍA PERTENECIENTE AL MUNICIPIO DE SAN PEDRO HUAMELULA, OAXACA. (ELABORACIÓN PROPIA.....	8
FIGURA 4.-DE CONTORNO COLOR ROJO SE OBSERVA LA DISTRIBUCIÓN TERRITORIAL DE LA SIERRA MADRE DEL SUR Y CON UN RECUADRO AMARRILLO SE SEÑALA LA ZONA DE ESTUDIO, ENCONTRÁNDOSE AL SE DE LA PROVINCIA FISIGRÁFICA. (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN METADATOS DE INEGI).....	9
FIGURA 5.- DE CONTORNO COLOR ROJO SE OBSERVA LA SIERRA MADRE DEL SUR Y LAS SUBPROVINCIAS FISIGRÁFICAS SE ENCUENTRAN SEÑALADAS DE COLOR MORADO Y CON UN RECUADRO AMARRILLO SE SEÑALA LA ZONA DE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN METADATOS DE INEGI).....	10
FIGURA 6.-DE CONTORNO COLOR ROJO SE OBSERVA LA SIERRA MADRE DEL SUR, DE COLOR AMARILLO SE SEÑALAN LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE TOPOFORMAS QUE CORRESPONDEN A LA ZONA DE ESTUDIO Y CON UN RECUADRO NEGRO SE SEÑALA LA ZONA DE ESTUDIO (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE E.....	11
FIGURA 7.- MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO ESCALA 1:250,000. EN EL SÍMBOLO ASIGNADO DE COLOR NEGRO SE OBSERVA LA UBICACIÓN DONDE SE EFECTUARON LOS CUATRO SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV'S) Y SE OBSERVA QUE EL TIPO DE ROCA QUE PREDOMINA EN LA ZONA CORRESPONDE A MATERIAL ALUVIAL. ....	13
FIGURA 8.- CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS TECTONOESTRATIGRÁFICOS, DONDE LA UBICACIÓN DE SANTA MARÍA SESTA SEÑALADA CON CIRCULO NEGRO DENTRO DE UN POLÍGONO ROJO DONDE CORRESPONDE AL TERRENO CHANTINO. (MODIFICADO DE SOLARI ET AL., 2004) .....	15
FIGURA 9.-EXTENSIÓN DE LA FALLA CHACALAPA CON DIRECCIÓN W-E, SIENDO EL LÍMITE DEL TERRENO CHANTINO CON LOS TERRENOS MIXTECO Y ZAPOTECO, CON UN PUNTO NEGRO DENTRO DE UN POLÍGONO ROJO SE SEÑALA LA ZONA DE ESTUDIO (RECUPERADA Y MODIFICADA DE ORTEGA-GUTIÉRREZ, 1999) .....	16
FIGURA 10.-MAPA HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO ESCALA 1:21,085; DONDE SE OBSERVAN UN CONJUNTO DE ESCURRIMIENTOS CONCENTRADOS EN LA ZONA ESTUDIADA, CON UN CÍRCULO NEGRO SE SEÑALAN LA ZONA DONDE SE REALIZARON LOS SEVS (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN METADATOS DE .....	17
FIGURA 11.- MAPA DE LA EXTENSIÓN DEL ACUÍFERO SANTIAGO ASTATA Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO SEÑALADA CON UN PUNTO NEGRO DENTRO DE UN POLÍGONO CORRESPONDIENTE A SANTA MARÍA HUAMELULA, SAN PEDRO HUAMELULA, OAXACA. (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN METADATOS DE INEGI. ....	19
FIGURA 12.- MAPA GEOLÓGICO DEL ACUÍFERO SANTIAGO ASTATA Y CON UN PUNTO DENTRO DE UN POLÍGONO SE ENCUENTRA SEÑALADA LA ZONA DE ESTUDIO. (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE DEL ESTUDIO TÉCNICO DE CONAGUA, 2011).....	20
FIGURA 13MAPA EDAFOLÓGICO DEL ACUÍFERO SANTIAGO ASTATA, Y LA ZONA DE ESTUDIO SEÑALADA CON UN PUNTO DENTRO DE UN POLÍGONO, PREDOMINANDO LOS SUELOS TIPO FEZEM, CAMBISOL Y LUVISOL. (ELABORACIÓN PROPIA CON BASE DEL ESTUDIO TÉCNICO DE CONAGUA, 2011) .....	22

FIGURA 14.-MODELO DE UN SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL (SEV), DONDE A MEDIDA QUE SE ABRE LA DISTANCIA AB, AUMENTA LA PROFUNDIDAD DE INVESTIGACIÓN (IMAGEN EDITADA MODIFICADA DE SÁNCHEZ, 1987). .....	30
FIGURA 15.-MODELO DEL ARREGLO ELECTRÓDICO SCHLUMBERGER (IMAGEN MODIFICADA DEL “MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO”, CONAGUA,2007). .....	31
FIGURA 16.-MODELO DEL PRINCIPIO DE UN CORTE GEOELÉCTRICO (MODIFICADO DE CANTOS,1974). .....	34
FIGURA 17.-MODELO GEOELÉCTRICO DE 2 CAPAS (RECUPERADO Y MODIFICADO DE CANTOS, 1974).....	35
FIGURA 18.-MODELO Y GRÁFICA DE LOS CORTES GEOELÉCTRICOS TIPO H, K, A, Q (RECUPERADO Y MODIFICADO DE CANTOS, 1974).....	36
FIGURA 19.-MODELO DE LOS CORTES GEOELÉCTRICOS DE 5 O MÁS CAPAS (MODIFICADO DE CANTOS, 1974).....	37
FIGURA 20.-EQUIPO DE RESISTIVIDAD UTILIZADO PARA REALIZAR EL ESTUDIO GEOELÉCTRICO (SEV’s) EN LA LOCALIDAD DE SANTA MARÍA HUAMELULA, PERTENECIENTE AL MUNICIPIO DE SAN PEDRO HUAMELULA, OAXACA. ....	39
FIGURA 21.-EN LA PARTE SUPERIOR SE OBSERVA LA HOJA DE CÁLCULO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE, EN LA PARTE INFERIOR IZQUIERDA LOS VALORES CORRESPONDIENTES DE LA RESISTIVIDAD APARENTE CON RESPECTO A AB/2 Y EN LA PARTE DERECHA LA CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE DEL SEV#1. ....	40
FIGURA 22.-MODELO DE BLOQUES Y AJUSTE DE CAPAS MEDIANTE EL SOFTWARE ZONDIP1D 2012. ....	41
FIGURA 23.-.-EN LA PARTE SUPERIOR (A) SE MUESTRAN LOS RESULTADOS DE LA INTERPOLACIÓN DE LOS SEV’S 1-3-4, EN LA PARTE INFERIOR (B) LOS RESULTADOS DE LA INTERPOLACIÓN DE LOS SEV’S 2-3-4, DONDE SE OBSERVAN LA PSEUDOSECCIÓN Y SECCIÓN DE RESISTIVIDAD CON BASE EN EL DE .....	42
FIGURA 24.-AJUSTE DE CURVAS DE RESISTIVIDAD Y ERROR RMS DEL MODELO DE CAPAS SEV - 1(PERFIL GENERADO EN ZOONDIP1D). 43	
FIGURA 25.-LITOLOGÍA DEL CORTE GEOELÉCTRICO CORRESPONDIENTE AL SEV-1 Y SU DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA.....	45
FIGURA 26.-AJUSTE RMS DEL MODELO DE CAPAS SEV -2 (PERFIL GENERADO EN ZOONDIP1D).....	46
FIGURA 27.-LITOLOGÍA DEL CORTE GEOELÉCTRICO CORRESPONDIENTE AL SEV-2 Y SU DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA.....	48
FIGURA 28.-AJUSTE RMS DEL MODELO DE CAPAS SEV -3 (PERFIL GENERADO EN ZOONDIP1D). ....	49
FIGURA 29.-LITOLOGÍA DEL CORTE GEOELÉCTRICO CORRESPONDIENTE AL SEV#3 Y SU DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA. ....	51
FIGURA 30.-AJUSTE RMS DEL MODELO DE CAPAS SEV -4 (PERFIL GENERADO EN ZOONDIP1D). ....	52
FIGURA 31.- LITOLOGÍA DEL CORTE GEOELÉCTRICO CORRESPONDIENTE AL SEV#3 Y SU DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA. ....	53
FIGURA 32.-PSEUDOSECCIONES DE RESISTIVIDAD APARENTE. DE ROJO SE OBSERVAN LOS MATERIALES MÁS CONDUCTORES Y DE AZUL LOS MÁS RESISTIVOS QUE SE ASOCIAN A MATERIALES MÁS DUROS E IMPERMEABLES.....	54
FIGURA 33.-SECCIONES DE RESISTIVIDAD. DE ROJO SE OBSERVAN LOS MATERIALES MÁS CONDUCTORES Y DE AZUL LOS MÁS RESISTIVOS QUE SE ASOCIAN A MATERIALES MÁS DUROS E IMPERMEABLES (IMAGEN GENERADA EN ZOONDIP1D).....	55
FIGURA 34.-SECCIÓN GEOLÓGICA INFERIDA EN BASE A LOS RESULTADOS DE LOS SEV’S 3-1-4 REALIZADOS EN LA LOCALIDAD DE SANTA MARÍA HUAMELULA. ....	57
FIGURA 35.-SECCIÓN GEOLÓGICA INFERIDA EN BASE A LOS RESULTADOS DE LOS SEVS 3-2-4 REALIZADOS.....	58
FIGURA 36.- REGISTRO GEOFÍSICO DE POZO .....	64
FIGURA 37.-MEMORIA FOTOGRÁFICA DEL ESTUDIO GEOELÉCTRICO.....	66
FIGURA 38.-CAPTURA DE DATOS DE RESISTIVIDAD APARENTE.....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COORDENADAS UTM DE LOS SITIOS EXPLORADOS. ....	7
TABLA 2.-TABLA DE RANGO DE VALORES DE RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS Y MINERALES (AUTORIZADA Y MODIFICADA DE BELMONTE SERVICIOS GEOFÍSICOS-HIDROGEOLOGÍCOS- AMBIENTALES A.C). ....	26
TABLA 3 .- MUESTRA LAS PROFUNDIDADES RESULTANTES POR EL MODELO CON SU RESPECTIVA RESISTIVIDAD PARA EL SEV-1. DONDE N= NÚMERO DE CAPA, P= RESISTIVIDAD (OHM-M), H= ESPESOR (M), Z=PROFUNDIDAD DONDE INICIA LA CAPA (M). ....	44
TABLA 4 PROFUNDIDADES RESULTANTES POR EL MODELO CON SU RESPECTIVA RESISTIVIDAD DEL SEV-2. N= NÚMERO DE CAPA, P= RESISTIVIDAD (OHM-M), H= ESPESOR (M), Z=PROFUNDIDAD DONDE INICIA LA CAPA (M). ....	46
TABLA 5 PROFUNDIDADES RESULTANTES POR EL MODELO CON SU RESPECTIVA RESISTIVIDAD DEL SEV-3. N= NÚMERO DE CAPA, P= RESISTIVIDAD (OHM-M), H= ESPESOR (M), Z=PROFUNDIDAD DONDE INICIA LA CAPA (M). ....	49
TABLA 6 .-PROFUNDIDADES RESULTANTES POR EL MODELO CON SU RESPECTIVA RESISTIVIDAD DEL SEV-4. N= NÚMERO DE CAPA, P= RESISTIVIDAD (OHM-M), H= ESPESOR (M), Z=PROFUNDIDAD DONDE INICIA LA CAPA (M). ....	52

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN.**

El municipio de San Pedro Huamelula, se encuentra ubicado al sur del estado de Oaxaca, cuya población actual es de 10,014 habitantes; dentro de él, existen diversas localidades y una de ellas es Santa María Huamelula, que de acuerdo con INEGI (2015) el índice de crecimiento de la población ha ido en aumento, teniendo en 2005 1182 habitantes, llegando a 1374 habitantes actualmente censados.

Santa María Huamelula se identifica como una localidad de escasos recursos, siendo el agua potable el de mayor rezago, agua que es necesaria para sus principales actividades económicas, como son la agricultura, la tala forestal para la elaboración de maderas finas (INEGI, 2001) y aún más importante para su consumo propio. SEDESOL (2017) menciona que el indicador por acceso al agua potable tuvo una disminución relevante los últimos años. Parte de estos problemas se deben a que el agua que drena no se puede infiltrar debido a que la zona urbana se encuentra creciendo sobre roca metamórfica (INEGI, 2005).

Por lo que, para obtener resultados favorables ante la escasez de agua, se planteó determinar la situación hidrológica y geohidrológica de manera indirecta por medio de los métodos geoelectrónicos en la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) para determinar si existe la posibilidad de aprovechar el vital líquido.

La técnica geofísica de los SEV's tiene la finalidad de averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado (Orellana, 1982), es por ello por lo que son indicados para ubicar mantos acuíferos en la zona estudiada.

## **1.1 Planteamiento del problema.**

Santa María Huamelula no cuenta con los recursos hídricos necesarios que satisfagan sus necesidades básicas, por tal cuestión se llevó a cabo un estudio geofísico con la finalidad de aportar información del subsuelo y poder evaluar su potencial hídrico y de ser posible explotable, a fin de que las autoridades locales le den seguimiento a su problema de agua por medio de la perforación de un pozo.

## **1.2 Justificación.**

Santa María, perteneciente al municipio de San Pedro Huamelula se ha identificado como una localidad con escasez de agua, por lo que, para evaluar su potencial hídrico, se emplearon los sondeos eléctricos verticales debido a que son métodos ideales para ubicar mantos acuíferos y además permiten conocer la profundidad a la que se encuentran las capas que componen el subsuelo y sus espesores. El arreglo empleado en la prospección del lugar fue schlumberger, con aberturas  $AB/2=150m$ , hasta  $AB/2=250m$  para poder conocer las propiedades de resistividad del subsuelo.

El presente documento servirá como indicador en la perforación de un pozo profundo, asimismo, como referencia para futuros trabajos geofísicos o geohidrológicos dentro de la región de San Pedro Huamelula.

## **1.3 Objetivo general.**

Caracterizar y evaluar unidades geohidrológicas que cumplan con las características de almacenamiento y transmisión de agua subterránea, que permitan suministrar el vital líquido a la localidad de Santa María, mediante la determinación del espesor de las capas permeables y los límites del acuífero en profundidad en caso de existir.

## 1.4 Objetivos particulares.

- Caracterizar el subsuelo geológicamente mediante la interpolación de los SEV's con el fin de identificar las capas favorables para almacenar agua.
- Proponer un sitio a partir de la interpretación de los SEV's para realizar una perforación exploratoria.

## 1.5 Antecedentes.

En la localidad de Santa María no existen estudios geofísicos que ayuden a complementar la información del estudio geoeléctrico. Sin embargo, existe información correlacionable de cartografía de topografía, edafología, geología y vegetación del acuífero Santiago Astata (CONAGUA, 2011) que por extensión territorial el acuífero corresponde a la localidad de Santa María.

El estudio técnico de CONAGUA. - **“Determinación de la disponibilidad media anual de agua subterránea Acuífero 2020 Santiago Astata Estado de Oaxaca”** (CONAGUA, 2007), muestra las generalidades del acuífero Santiago Astata, datos como la disponibilidad media anual de agua subterránea, la recarga total media anual y la disponibilidad de aguas subterráneas (disponibilidad de 1'871,480 m<sup>3</sup> anuales).

Durante la etapa de trabajo de campo del estudio geoeléctrico se tomó información de los pozos norias aledaños a la zona estudiada, el primer pozo brindó información de la profundidad del espejo de agua (6m) y un segundo pozo la profundidad (35 metros) alcanzada por el pozo productor ubicado muy cerca de los puntos sondeados, la información sobre este segundo pozo es limitada dado que no se cuenta con un registro geofísico de pozo.

En la figura 1 se observan los 2 pozos cercanos a los puntos sondeados.



**Figura 1.-** Imágenes de los pozos cercanos a los puntos donde se realizaron los SEV's, El superior tiene una profundidad de 35 metros, y se observa un espejo de agua a 6 metros).

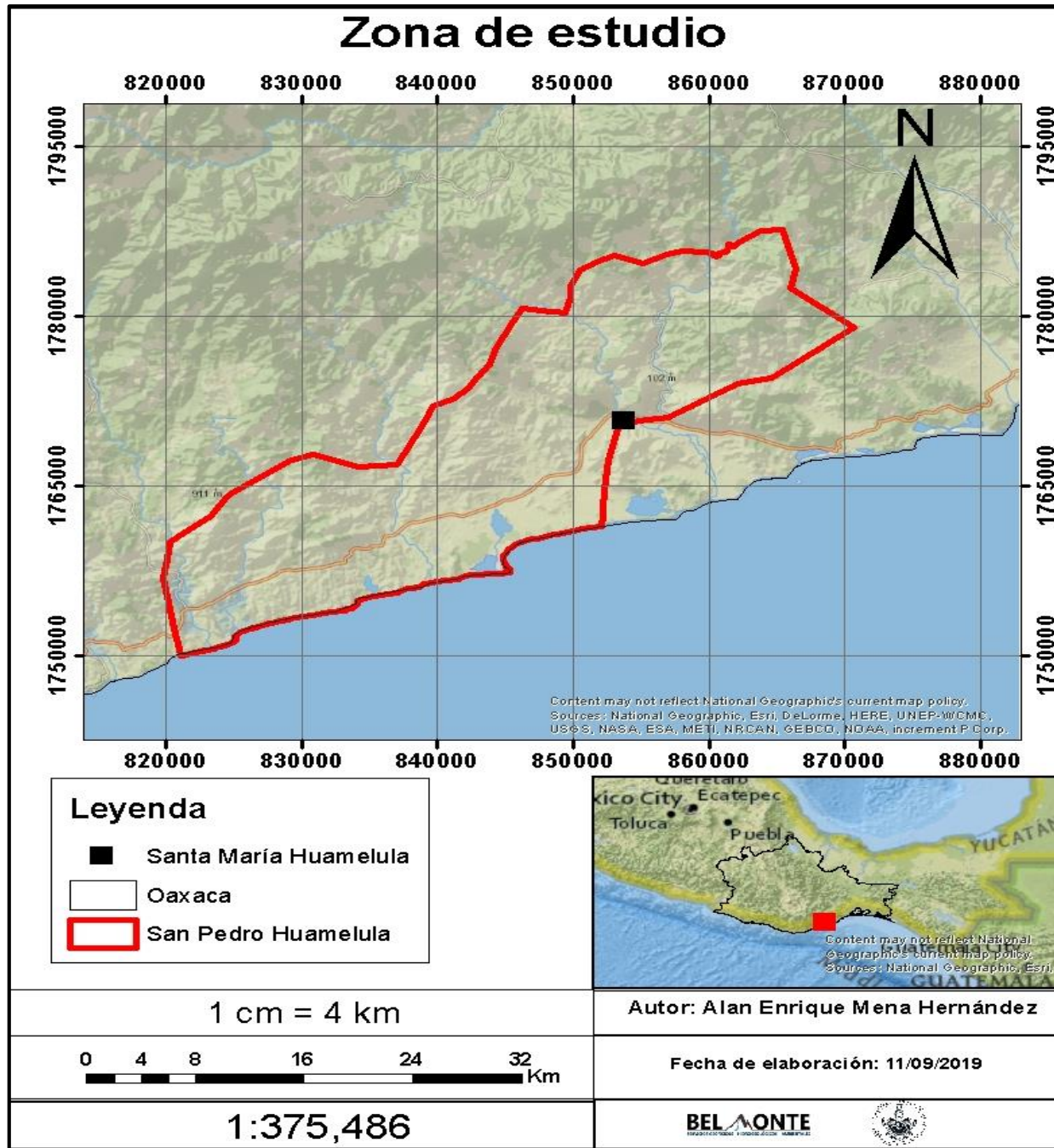
## **CAPÍTULO 2 - MARCO GEOLÓGICO E HIDROLÓGICO**

### **2.1 Localización de la zona de estudio.**

El municipio de San Pedro Huamelula se localiza en la región del Istmo de Tehuantepec al sureste del Estado de Oaxaca, en las coordenadas geográficas 95°40'00" longitud oeste, 16°01'00' latitud norte, a una altura promedio de 80 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2005).

El municipio limita al norte con los municipios de Magdalena Tequisistlán, Santa María Ecatepec y Santo Domingo Tehuantepec; al sur con el Océano Pacífico y Santiago Astata; al poniente con San Carlos Yautepec, San Miguel del Puerto; al oriente con Santo Domingo Tehuantepec, su distancia a la capital del estado es de 370km, en la figura 2,

se muestra a detalle la ubicación del municipio y la localidad donde se realizó el estudio geoelectrico (INEGI, 2005).



**Figura 2.-** Con un polígono rojo se señala la extensión del municipio de San Pedro Huamelula, con un círculo negro se señala la zona explorada perteneciente a la comunidad de Santa María. (Elaboración propia con base en metadatos de INEGI).

## 2.2 Localización del estudio Geoeléctrico.

La localidad de Santa María es parte del Municipio de San Pedro Huamelula que es perteneciente al estado de Oaxaca, y se posiciona en las coordenadas en el sistema de referencia UTM:

Coordenada Este: **210693 E**

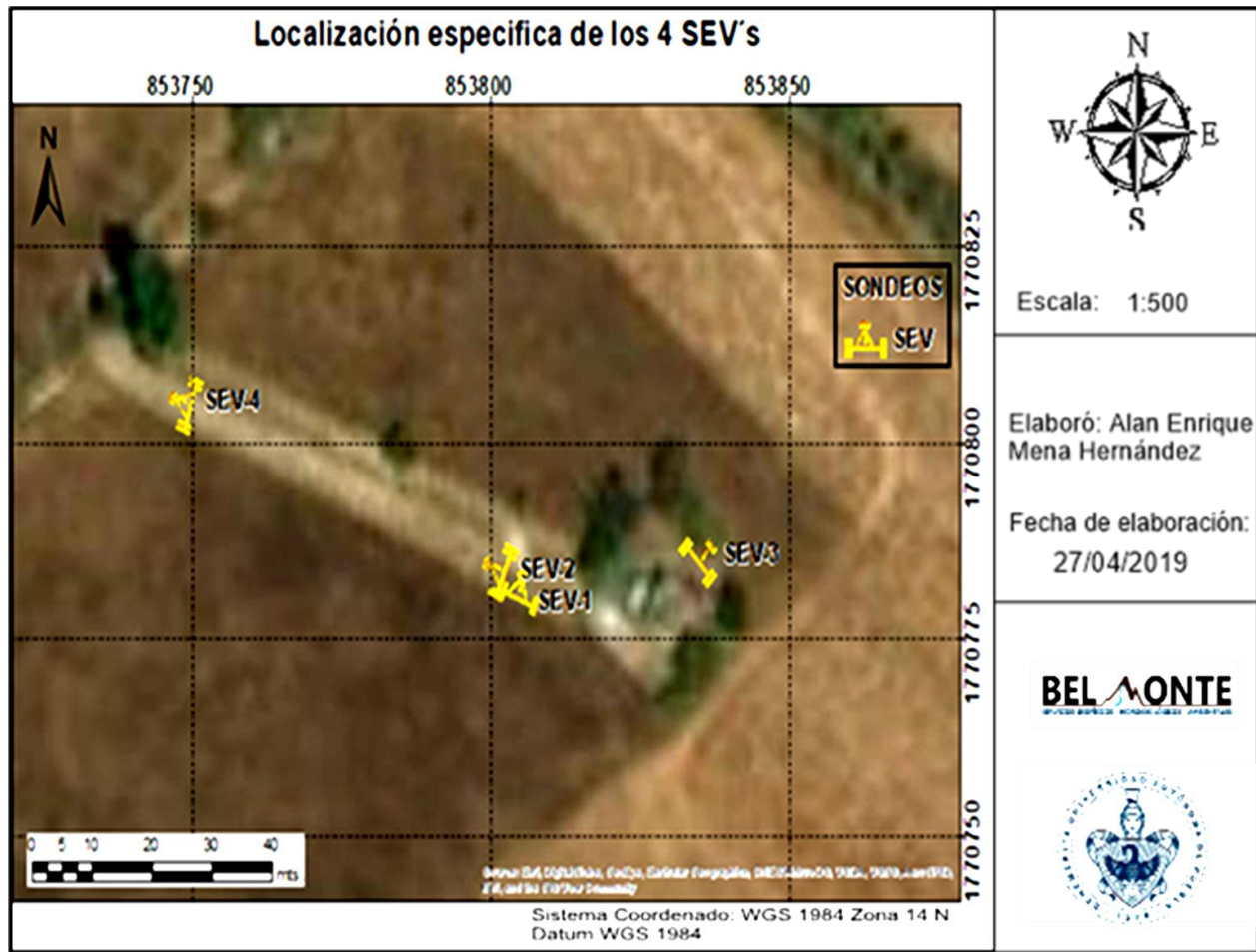
Coordenada Norte: **1769986 N**

En estudios geoeléctricos es conveniente indicar las coordenadas de la zona de estudio o de los SEV's para localizar los sitios en los cuales se realizaron las mediciones, en la tabla 1 se muestran las coordenadas UTM, Datum, Zona y elevación de los puntos sondeados.

Tabla 1. Coordenadas UTM de los sitios explorados.

			DATUM WGS1984 14N
Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) Zona 14N	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Elevación (m)
SEV 1 – SEV 2	211569	1769838	44
SEV 3	211600	1769841	44
SEV 4	211513	1769863	45

En la figura 3 se muestra la ubicación específica donde se realizaron los SEV's, en la que se encuentran indicados con mayor detalle su distribución sobre la zona de estudio.



**Figura 3.-**Ubicación delimitada de los 4 sitios donde se efectuaron los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), con las siglas SEV-1, SEV-2, SEV-3 y SEV-4 en la localidad de Santa María perteneciente al municipio de San Pedro Huamelula, Oaxaca. (Elaboración propia)

### 2.3 Generalidades de la zona de estudio.

Los aspectos geológicos de interés en el estudio geoelectrico en Santa María Huamelula, corresponden a las características de la provincia de la sierra madre del sur, que debido a su extensión territorial (12 350.35 Km<sup>2</sup>) se tomaron en cuenta las características geológicas del flanco sur con la planicie costera del pacífico y el istmo de Tehuantepec (García et al., 2004). Para poder describir los aspectos geológicos de la zona de estudio, se tomó información de rasgos estratigráficos, geomorfológicos y tectonoestratigráficos, además de aspectos hidrogeológicos como la edafología y geología del acuífero correspondiente a Santa María (acuífero Santiago Astata), que en conjunto

complementaron las interpretaciones de la composición de las unidades litoestratigráficas con base a la resistividad calculada del estudio de SEV's.

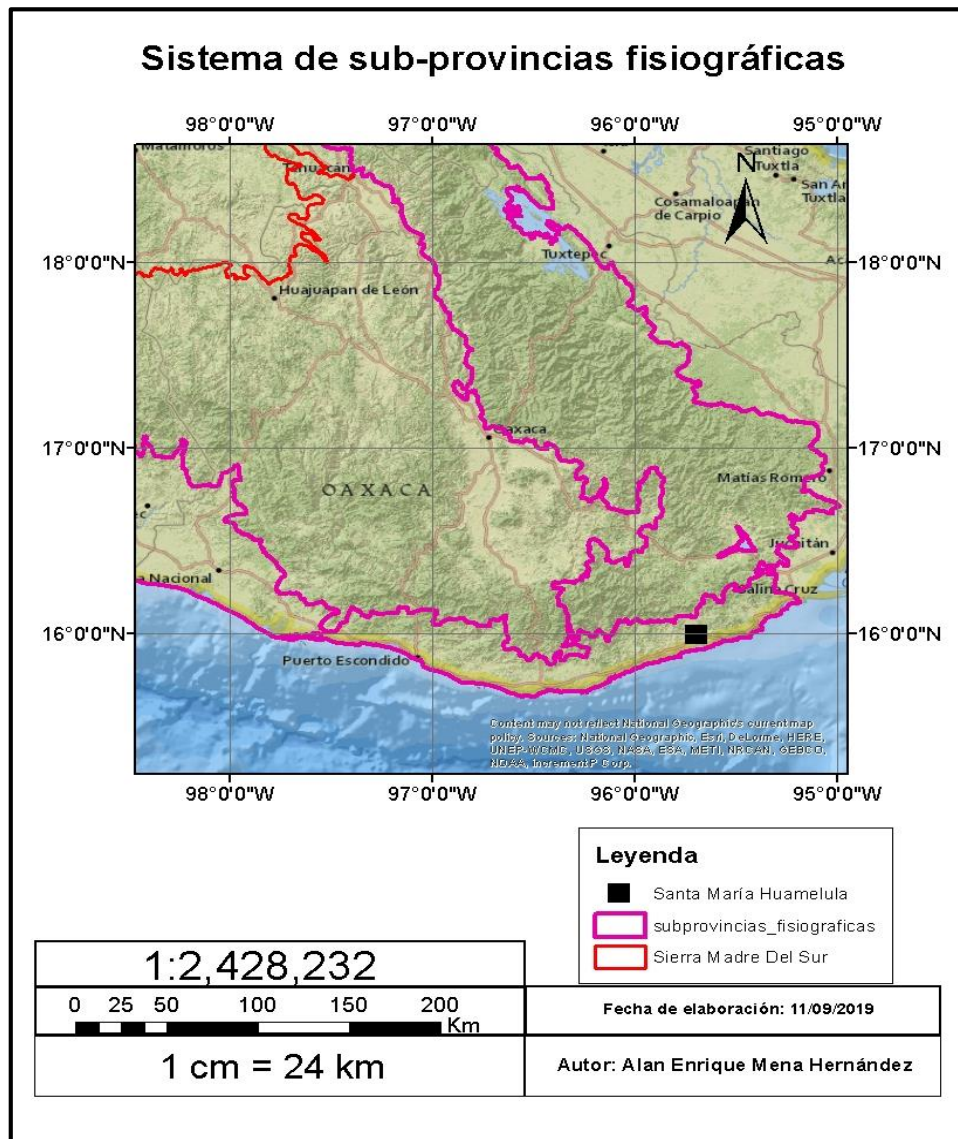
## 2.4 Fisiografía de la zona de estudio.

La provincia Sierra Madre del Sur limita al norte con la Faja Volcánica Transmexicana; al sur con el Océano Pacífico, al oriente con las provincias de sierras y valles del sureste y con la parte sur de la Planicie Costera del Golfo y tiene una extensión de 12 350.35km<sup>2</sup> (García et al., 2004) como se señala en la figura 4.



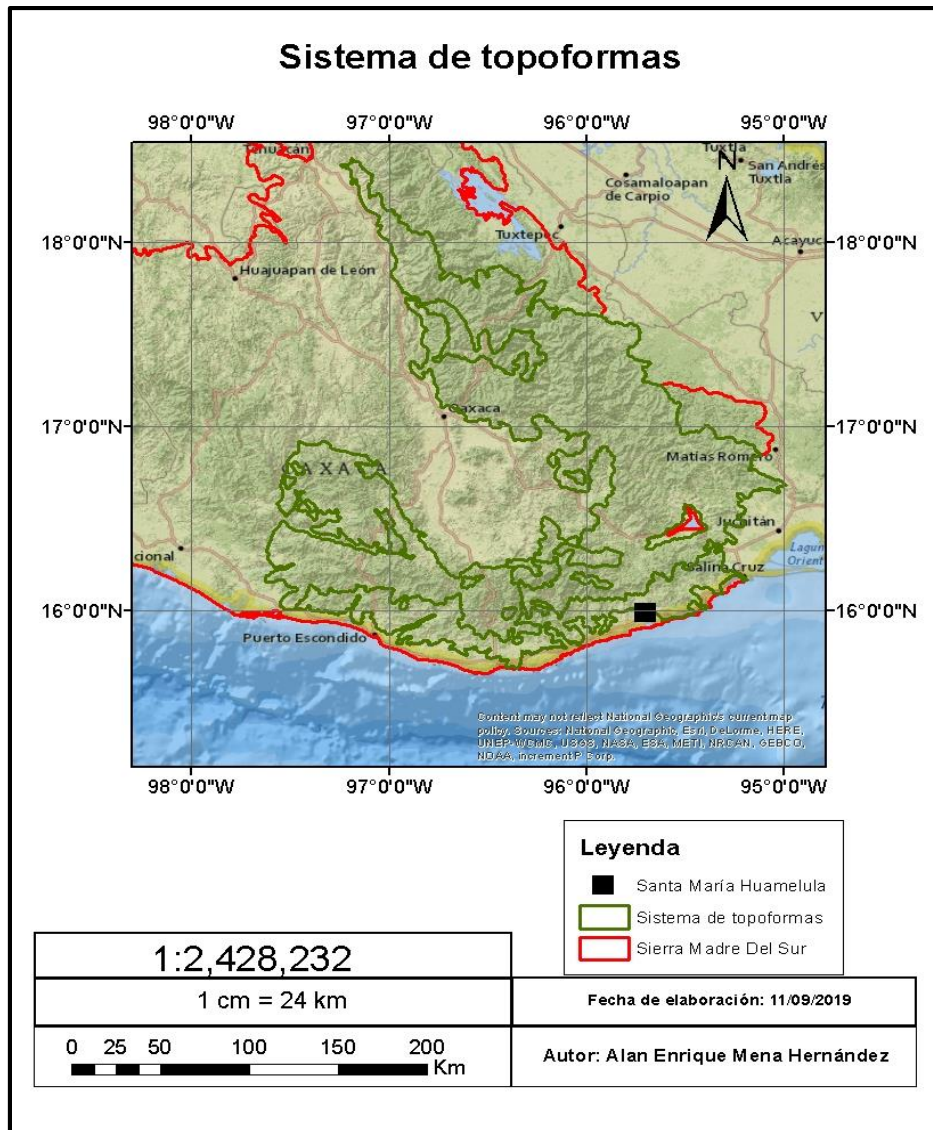
**Figura 4.-**De contorno color rojo se observa la distribución territorial de la Sierra Madre Del Sur y con un recuadro negro se señala la zona de estudio, encontrándose al SE de la provincia fisiográfica. (Elaboración propia con base en metadatos de INEGI).

La localidad de Santa María, San Pedro Huamelula, Oaxaca se encuentra ubicada dentro de las subprovincias fisiográficas Costas del Sur y Sierras orientales, pertenecientes a la provincia de la Sierra Madre del Sur como se señala en la figura 5.



**Figura 5.-** De contorno color rojo se observa la Sierra Madre Del Sur y las subprovincias fisiográficas se encuentran señaladas de color morado, con un recuadro amarillo se señala la zona de estudio. (Elaboración propia con base en metadatos de INEGI).

La figura 6 muestra los principales sistemas de topoformas presentes en la zona de estudio que corresponden a la Sierra baja compleja, Lomerío con llanuras, Llanura costera con lomerío y Sierra alta compleja (Sierra de Juárez).



**Figura 6.**-De contorno color rojo se observa la Sierra Madre Del Sur, de color amarillo se señalan los principales sistemas de topoformas que corresponden a la zona de estudio y con un recuadro negro se señala la zona de estudio (Elaboración propia con base en metadatos del INEGI).

## **2.5 Estratigrafía Sierra Madre del Sur.**

La Sierra Madre del Sur es una cadena montañosa compuesta principalmente por un basamento de rocas metamórficas que fueron desplazadas durante el Jurásico y un batolito que constituye el Macizo de Oaxaca, en la provincia también se encuentran secuencias del cretácico, así como rocas volcánicas intrusivas del terciario (García et al, 2004).

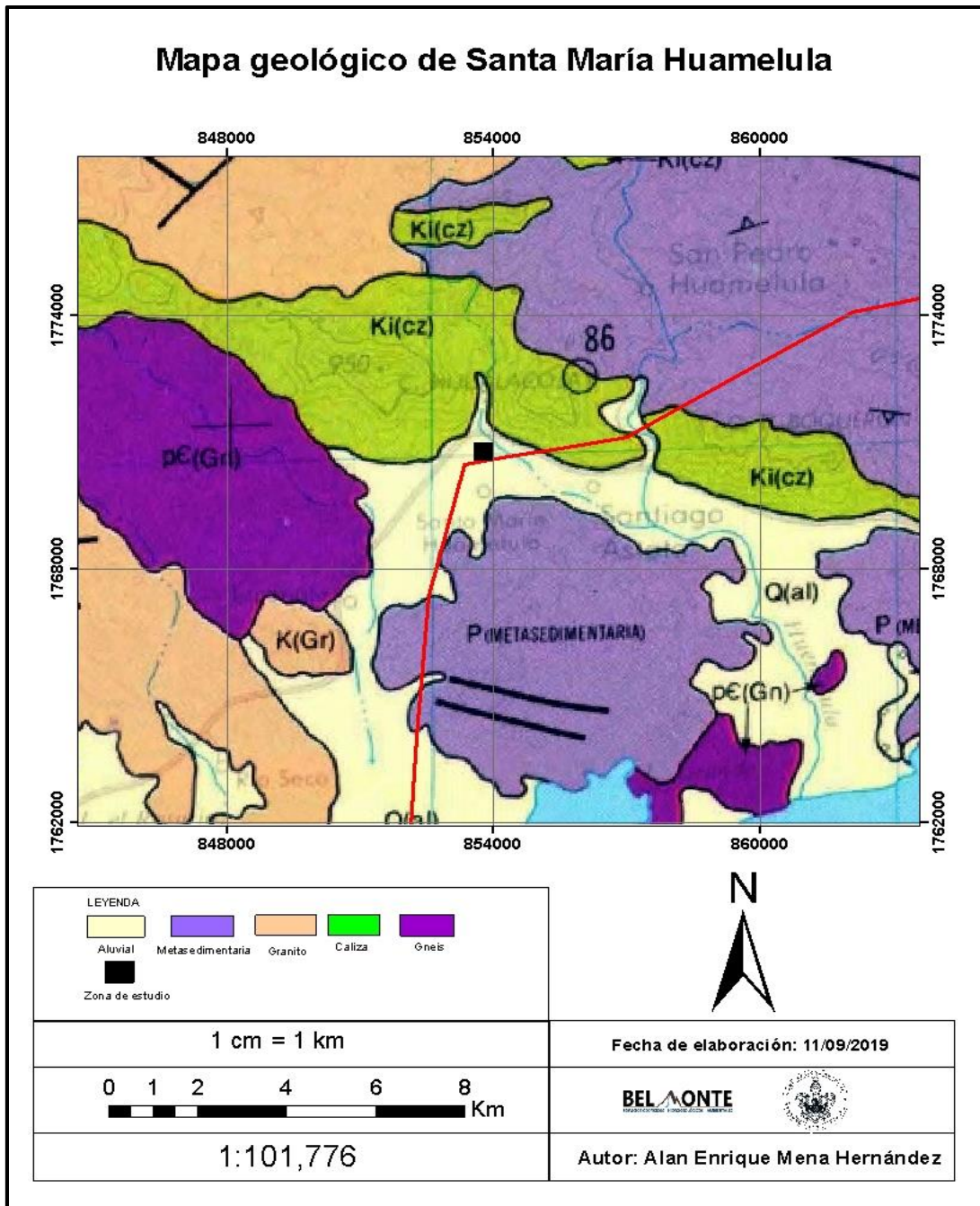
La presencia de rocas precámbricas en la zona de estudio corresponde a la formación del istmo de Tehuantepec, aunque no se tienen evidencias de rocas precámbricas en la zona estudiada aun considerando su cercanía (García et al, 2004), además está compuesta de rocas de un periodo no reconocible o aplicable en un 61%, cretácicas en un 28% ,el resto de jurásicas en un 1% , donde la zona urbana de San Pedro Huamelula se encuentra asentada sobre roca metamórfica (INEGI, 2005).

## **2.6 Geología Local.**

El principal tipo de rocas que afloran en la localidad son metamórficas, en orden de mayor ocurrencia se encuentran las de tipo metasedimentaria (31%), complejo metamórfico (23.00%) y gneis (8%) que son rocas metamórficas, además, existen rocas sedimentarias tales como caliza (5%) y la presencia abundante de roca ígnea intrusiva tipo granito en un (23%).

El tipo de suelos que predomina es aluvial (9.55%), lacustre (0.51%) y litoral (0.51%) (INEGI, 2005). De tal manera, que en la región afloran rocas que cronológicamente comprenden desde el Precámbrico (Istmo de Tehuantepec) hasta el Cenozoico.

En la figura 7, se encuentran las características geológicas de la localidad y la ubicación de los SEV's predominando los materiales del tipo aluvial en la zona estudiada perteneciente a la localidad de Santa María.



**Figura 7.-** Mapa geológico de la zona de estudio escala 1:250,000. En el símbolo asignado de color negro se observa la ubicación donde se efectuaron los cuatro sondeos eléctricos verticales (SEV'S) y se observa que el tipo de roca que predomina en la zona corresponde a material aluvial.

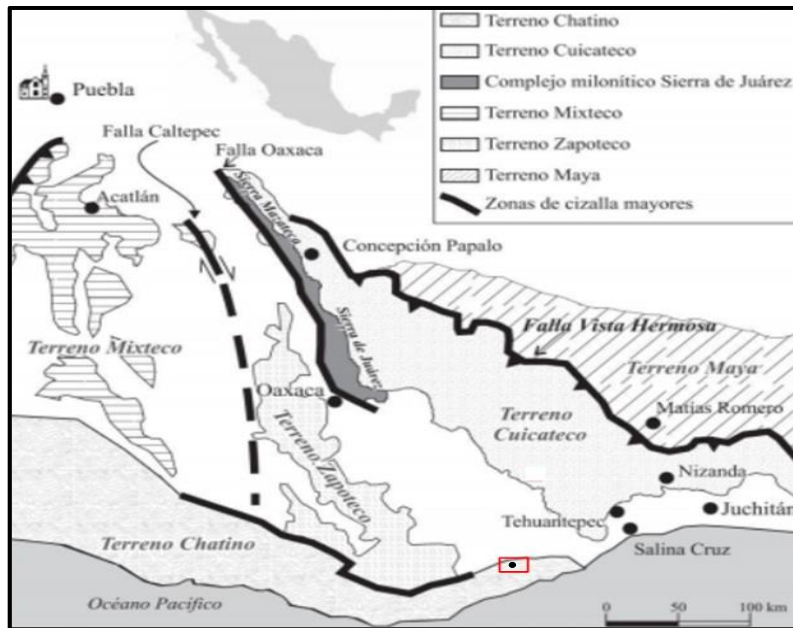
## **2.7 Terrenos tectonoestratigráficos y principales fallas correspondientes a la región de Santa María, San Pedro Huamelula, Oaxaca.**

La Sierra Madre del Sur ha sido dividida en terrenos tectonoestratigráficos (Sedlock et al.,1993), en la que el área estudiada (Santa María), está comprendida dentro de los límites de los terrenos tectonoestratigráficos Chantino y Zapoteco.

### **2.7.1 TERRENO CHANTINO.**

En la figura 8 se muestra el Terreno Chatino que limita al sur con el océano pacífico, al norte con los terrenos Zapoteco, Mixteco y Nahuatl, siendo la Falla Chacalapa el límite con estos terrenos, consiste en su mayoría de ortogneises y de rocas metasedimentarias y la unidad más antigua del Terreno Chatino es el Complejo Xolapa. El complejo Xolapa está formado por rocas en facies de anfibolita y migmatita, así como ortogneises, anfibolitas, esquistos pelíticos, esquistos de biotita y mármol (Sedlock et al.,1993).

Sobreyaciendo encuentra la Formación Tiñu, la cual está formada por rocas clásticas y carbonatadas de edades Cámbrico-Ordovícico (Landing et al., 2007); Sobreyaciendo a la formación Tiñu se encuentra la columna de rocas clásticas y carbonatadas de edades que van desde el Pérmico hasta el Cenozoico. Otro terreno de importancia geológica debido a su cercanía de la zona de estudio es el Zapoteco, donde el basamento está conformado por rocas metamórficas del Complejo Oaxaqueño; la unidad del complejo oaxaqueño está formada por una serie de paragneises y ortogneises, meta-anortositas, rocas metamórficas calcosilicatadas y charnoquitas, por otra parte, las rocas del Complejo Oaxaqueño tienen edades precámbricas de 1100 Ma. (Ortega-Gutiérrez, 1981; Keppie et al., 2003) lo cual las convierte en el basamento más antiguo del sur de México.



**Figura 8.-** Clasificación de los terrenos tectonoestratigráficos, donde la ubicación de Santa María está señalada con círculo negro dentro de un polígono rojo que se ubica en el terreno Chatino. (Modificado de Solari et al., 2004).

## 2.7.2 Falla Chacalapa.

La Falla Chacalapa presenta un rumbo general E-W y una extensión de 50 km que cruza por la localidad de Santa María, esta falla yuxtapone las rocas del Complejo Oaxaqueño con las del Complejo Xolapa.

La deformación de esta falla es dúctil y presenta milonitas y un desplazamiento lateral izquierdo, el espesor de las zonas miloníticas varía desde cientos de metros hasta los 2km (Tolson, 2005).

La Falla Chacalapa registra una actividad tectónica desde el Oligoceno hasta el presente, donde las milonitas de esta falla se ubican en edad entre los 29 y los 23 Ma (Tolson, 2005).

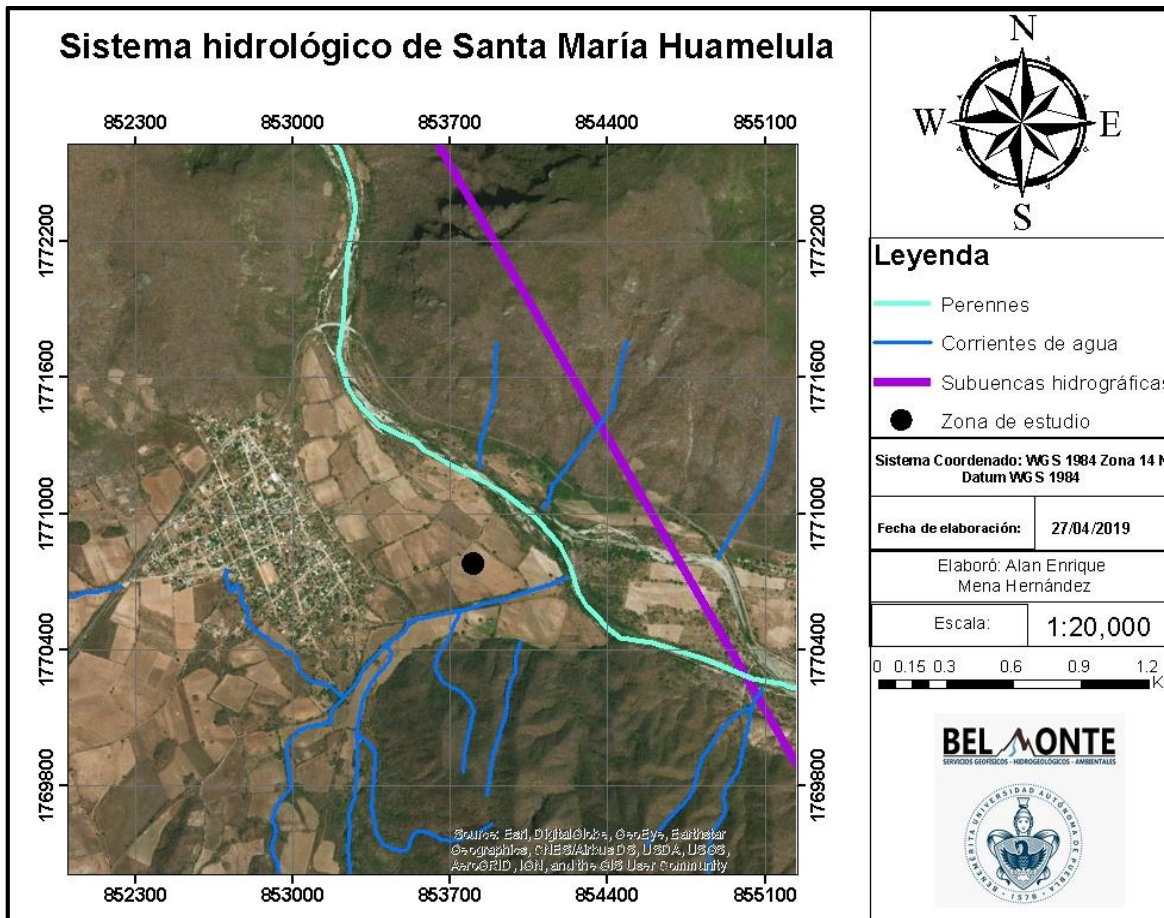
En la figura 9 de color rojo oscuro, se observa la extensión de la falla Chacalapa, que posiblemente se encuentre sobre un sistema de fracturas que pueda alojar agua en sus cavidades, y la zona de estudio señalada con un punto negro dentro de un polígono rojo.



**Figura 9.**-Extensión de la Falla Chacalapa con dirección W-E, siendo el límite del terreno Chatino con los terrenos Mixteco y Zapoteco, con un punto negro dentro de un polígono rojo se señala la zona de estudio (Recuperada y modificada de Ortega-Gutiérrez, 1999).

## 2.8 Marco hidrológico.

La localidad de Santa María, San Pedro Huamelula se ubica en su totalidad dentro de la región hidrológica Costa de Oaxaca Puerto Ángel (100%), pertenece a la cuenca R. Astata y Otros (100%). Las subcuencas que corresponden al municipio son: Sin nombre (41.58%), R. Astata (30.37%), A. Platanar (14.90%), R. Chacalapa (8.59%) y R. Zimatlán (4.56%). Las corrientes de agua son Intermitentes; Agua Grande, El Ciruelo y Playa grande. Los Perennes correspondientes son Ayuta, Chacalapa, Gavilán, Grande, Huamelula y Zimatán (INEGI, 2004). En la figura 10 se muestra el sistema hidrológico de la zona de estudio y se observan varios escurrimientos que se concentran dentro del área debido a las corrientes intermitentes, Perennes y cuencas hidrológicas, aledañas a la zona de estudio aumentando su potencial para almacenar agua.



**Figura 10.-**Mapa hidrológico de la zona de estudio escala 1:21,085; Donde se observan un conjunto de escurrimientos concentrados en la zona estudiada, con un círculo negro se señalan la zona donde se realizaron los SEVS (Elaboración propia con base en metadatos del INEGI).

### 2.8.1 DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO SANTIAGO ASTATA.

La localidad de Santa María corresponde hidrológicamente al acuífero Santiago Astata que se localiza en la porción sur del estado de Oaxaca, y abarca un área de 1 797.7 km<sup>2</sup>.

En la región del acuífero, el clima es principalmente cálido subhúmedo y en menor proporción templado subhúmedo y se registra una precipitación media anual de 942mm (CONAGUA, 2007).

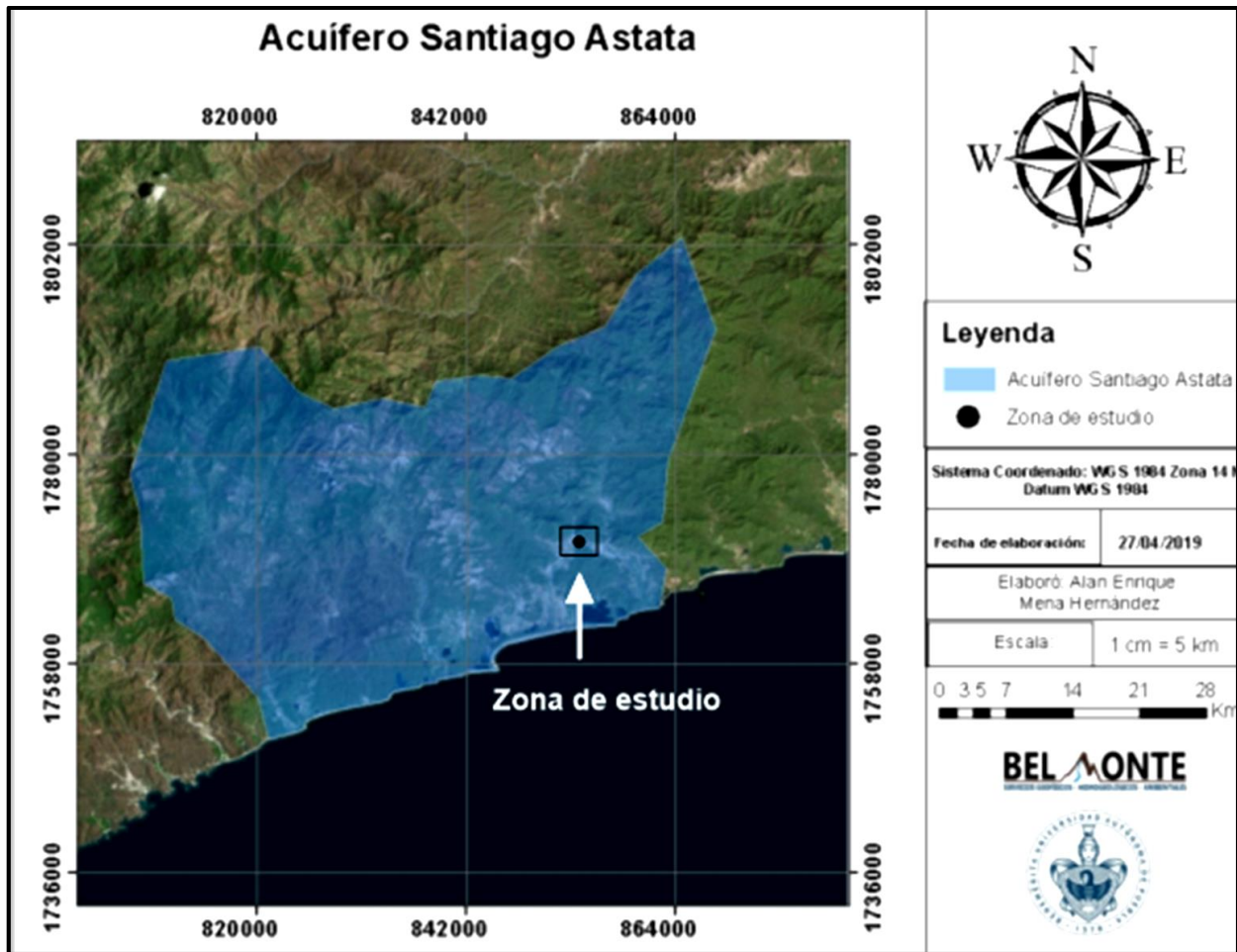
Por otra parte en la región de San Pedro Huamelula, predomina el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, siendo estos los meses más abundantes en cuanto a precipitaciones en el municipio, estas precipitaciones están relacionadas con las precipitaciones que origina la provincia

fisiográfica de la Sierra Madre del sur donde los valores de recarga de los acuíferos son relativamente altos (INEGI, 2005), y que dan una idea del potencial de recarga que tienen los acuíferos de la región.

El acuífero está constituido principalmente de arenas finas, arenas gruesas y gravas, las rocas presentan permeabilidad y capacidad de infiltración de media a alta, debido al origen de estas unidades se favorece la infiltración de los escurrimientos superficiales que llegan de la derivación de la Sierra Madre del sur principalmente (INEGI, 2015).

En la figura 11 se muestra la extensión del acuífero y la zona de estudio que se encuentra dentro de un área de recarga potencialmente alta debido a los índices de precipitación media anual que presenta el acuífero (942mm) y a las rocas que constituyen el acuífero (CONAGUA, 2007).

El acuífero Santiago Astata, es de tipo libre, heterogéneo y semiconfinado con un espesor estimado de 18 metros y la dirección predominante del flujo subterráneo es del noreste hacia el suroeste, desde la zona de recarga en las estribaciones de la Sierra Madre del Sur principalmente, hasta descargar en forma natural hacia el océano pacífico (INEGI, 2015).



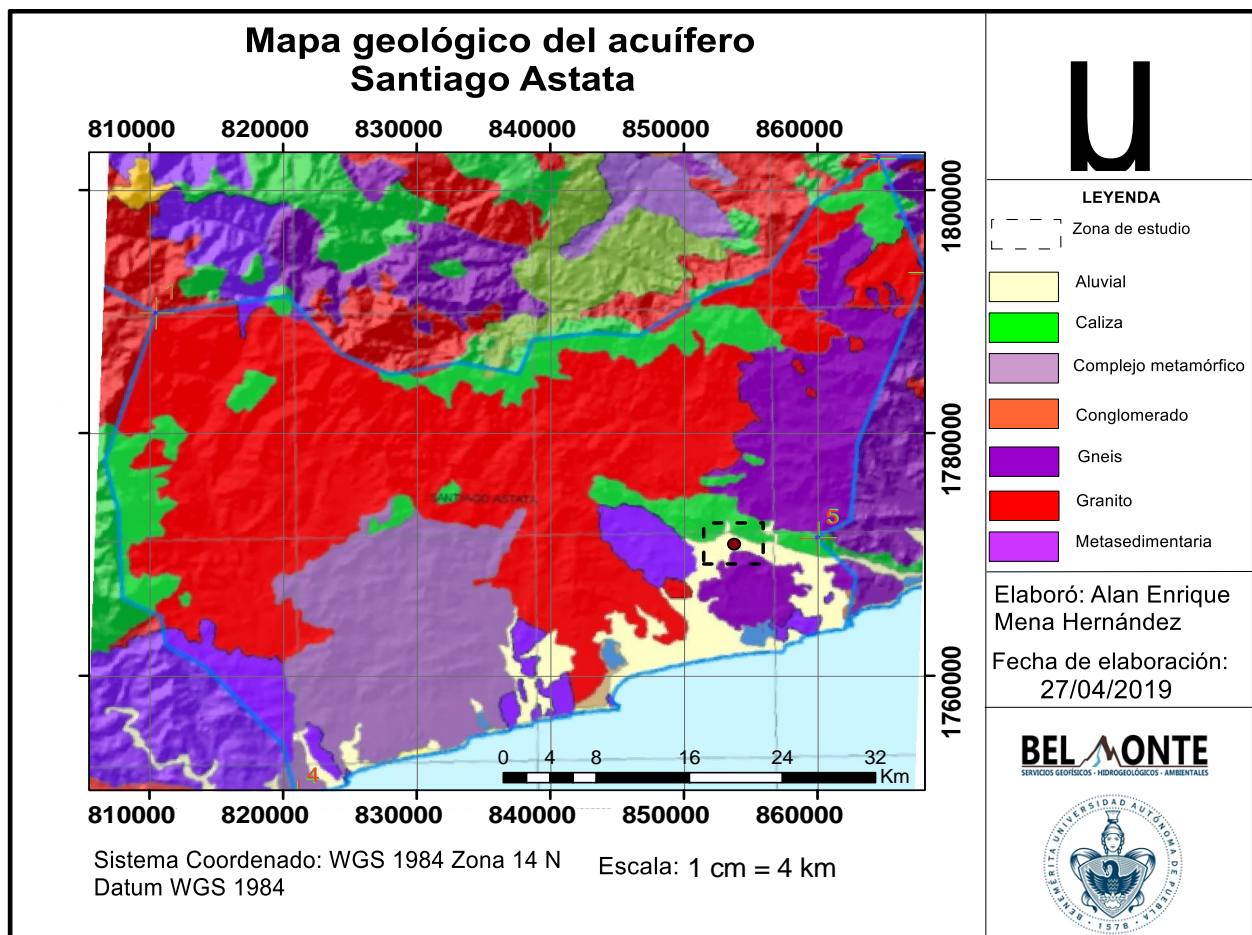
**Figura 11.-** Mapa de la extensión del acuífero Santiago Astata y ubicación de la zona de estudio señalada con un punto negro dentro de un polígono correspondiente a Santa María Huamelula, San Pedro Huamelula, Oaxaca. (Elaboración propia con base en metadatos de INEGI).

## 2.8.2 GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO.

La parte central del acuífero está constituido principalmente por rocas ígneas intrusivas (granito) y rocas metamórficas (complejo metamórfico, gneis y meta sedimentaria) que condicionan el almacenamiento del agua, en la costa hay presencia de rocas sedimentarias, como calizas y conglomerados, además de suelos aluviales y lacustres que conforman los litorales (CONAGUA, 2007), que son muy favorables en la formación de acuíferos.

Respecto a la geología del subsuelo, el acuífero, se encuentra alojado, en su porción superior, en los depósitos aluviales y fluviales de granulometría variada, principalmente

arenas con muy baja consolidación, de espesores reducidos, la porción inferior del acuífero está alojada en las rocas metamórficas del Complejo Metamórfico Xolapa y granodioritas, el basamento impermeable del acuífero está constituido por estas mismas rocas metamórficas y granodioritas al desaparecer el fracturamiento a profundidad (INEGI, 2015). En la figura 12 se observan las rocas que componen al acuífero Santiago Astata y se señala la zona de estudio con un punto morado dentro de un recuadro negro, donde los materiales predominantes son Aluviales, rodeando la zona de estudio se encuentran rocas tipo caliza, gneis y metasedimentaria regulando las condiciones en las que el agua se puede infiltrar y/o almacenar.



**Figura 12.-** Mapa geológico del acuífero Santiago Astata y con un punto morado dentro de un polígono negro se encuentra señalada la zona de estudio. (Elaboración propia con base del estudio técnico de CONAGUA, 2011).

La geomorfología en el área determina que las gravas, alojadas a lo largo de los cauces de ríos y arroyos que drenan el área, que se caracterizan por tener alta permeabilidad y capacidad de infiltración y constituyen la principal fuente de recarga al acuífero debido a la infiltración de los escurrimientos superficiales (INEGI, 2015).

### **2.8.3 Edafología del acuífero.**

Al sureste del acuífero (zona estudiada), se encuentra suelo tipo feozem; provienen de material eólico (loess) y otros materiales básicos no consolidados; tienen una capa superficial oscura, algo gruesa, con alto contenido de materia orgánica, son de profundidad muy variable y pueden alcanzar hasta 125cm , se identifican suelos de tipo luvisol que son depósitos aluviales recientes condicionados por la topografía, impermeables, con altos contenidos de arcilla acumulada en el subsuelo, provienen de una amplia variedad de materiales no consolidados, depósitos eólicos, aluviales y coluviales (CONAGUA, 2007). En la figura 13 se observa la distribución de los suelos que componen el acuífero y de la zona estudiada, indicando suelos feozem, cambisol y luvisol haciendo del terreno una zona de infiltración intermedia debido al contenido de arcilla de los suelos.

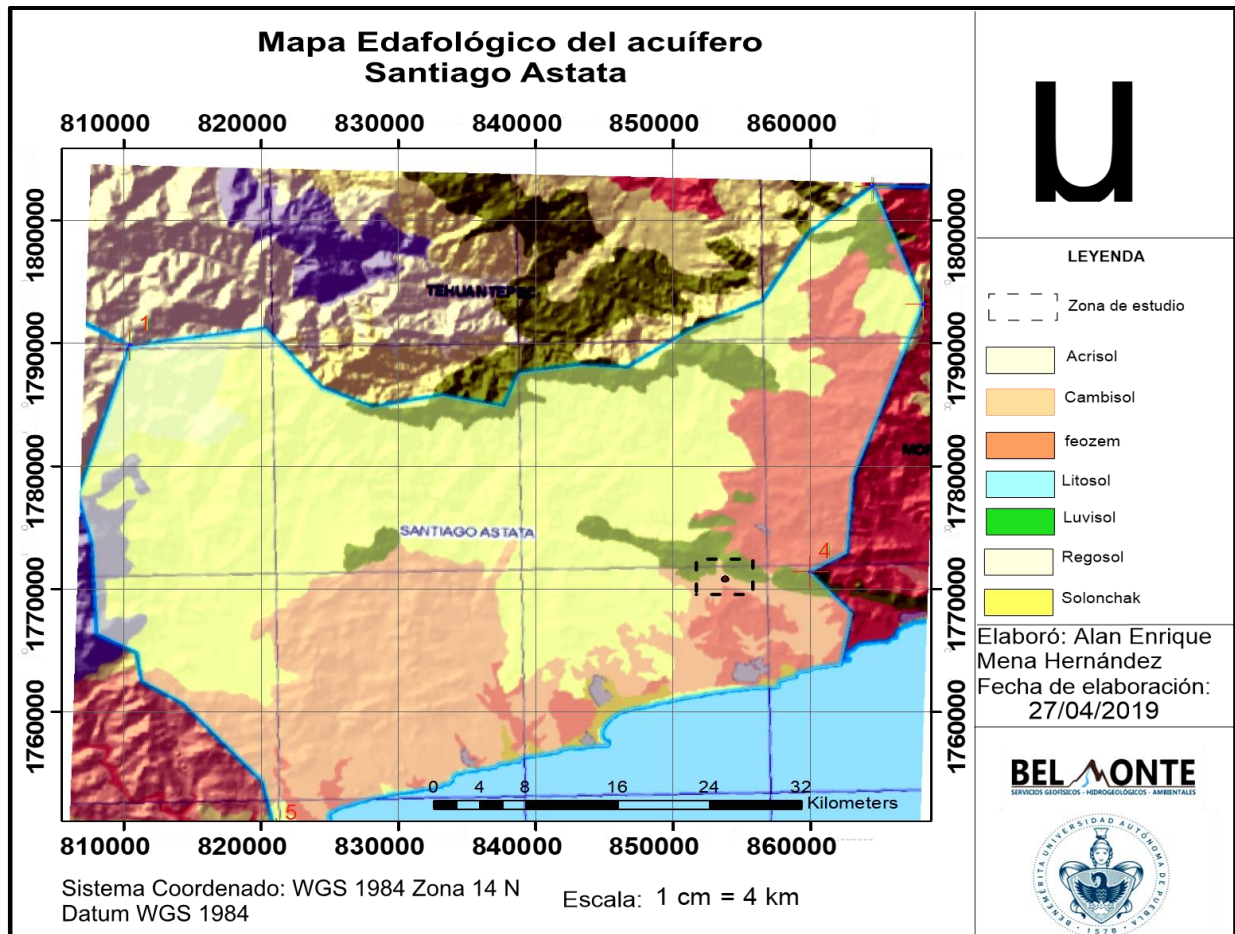


Figura 13.- Mapa edafológico del acuífero Santiago Astata, y la Zona de estudio señalada con un punto dentro de un polígono, Predominando los suelos tipo Feozem, Cambisol y luvisol. (Elaboración propia con base del estudio técnico de CONAGUA, 2011).

## CAPÍTULO 3 – MARCO TEÓRICO

### 3.1 Teoría de la prospección geoelectrica.

Teórica y físicamente, existen tres magnitudes que en principio podrían utilizarse para identificar los cuerpos situados en el subsuelo, estas magnitudes son la permeabilidad magnética  $\mu$ , la constante dieléctrica o permitividad (épsilon) y la resistividad  $\rho$  (Orellana, 1982)

Estas resistividades están directamente relacionadas con la composición mineralógica de las rocas, el contenido de fluidos, la porosidad y el grado de saturación de los poros (Orellana, 1982).

Debido al comportamiento de resistividad que presentan los materiales, las técnicas de prospección geoelectrica, han proporcionado información de gran utilidad durante muchos años para diversas áreas de investigación como son la hidrogeología, minería, geotecnia y estudios ambientales (Loke, 2004).

Primero se definen las ecuaciones de Maxwell donde las tres propiedades eléctricas que distinguen a un medio o bien a las rocas son:

$$\mu_0 = \text{Permeabilidad Magnética} \cong \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ henry}}{m}$$

$$\epsilon = \text{Permitividad eléctrica} \left( \frac{\text{faradios}}{m} \right) 8.854 \ 187 \ 817 \times 10^{-12} \text{ (Vacío)}$$

$$\sigma = \text{Conductividad eléctrica} \left( \frac{\text{siemens}}{m} \right)$$

Donde la propiedad eléctrica de interés es la conductividad eléctrica, la cual se usa normalmente para el tratamiento matemático (Pérez, 2010), en la práctica de la prospección geoelectrica los parámetros que se miden son la diferencia de potencial y la intensidad de corriente, pero el parámetro físico que se obtiene es la mencionada resistividad del subsuelo  $\rho$  (*Rho*) que resulta ser el inverso de la conductividad eléctrica.

### 3.2 Resistividad eléctrica.

Para poder entender mejor los efectos de la resistividad, primero se define a la resistencia, que se describe como la medida de la oposición de un material al paso de la corriente eléctrica y su unidad de medida es el Ohm, la resistencia se define por la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Donde  $L$  y  $A$  representan la longitud y la sección transversal del cuerpo y la constante de proporcionalidad lineal es la resistividad  $\rho$  (*Rho*), que es un parámetro característico de cada material.

La magnitud  $\rho$  (*Rho*), es un coeficiente que depende de la naturaleza del cuerpo considerado y recibe el nombre de resistividad, su medida es Ohm-metro ( $\Omega \cdot m$ ), y se define como una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado, pero igualmente podría haberse considerado la facilidad de paso (Orellana, 1982).

Entonces su valor ( $\Omega \cdot m$ ), describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es y su ecuación es la siguiente:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad, que es proporcional a su longitud e inversamente proporcional a la conductividad  $\sigma$ .

En los métodos eléctricos los valores de resistividad de los materiales en el subsuelo tienen un mayor rango de variación en comparación con otras magnitudes físicas como la densidad, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, la resistencia y la magnetización (Orellana, 1982).

Sin embargo, la resistividad de las rocas varía en amplios márgenes, por lo que es casi imposible asignar valores específicos a los diversos tipos de roca; no obstante, se pueden estimar criterios observando tablas publicadas en libros y manuales de constantes físicas (CONAGUA, 2007).

Los valores de resistividad utilizados en esta tesis están basados en la síntesis de valores de resistividad de la empresa geofísica BELMONTE Servicios Geofísicos-Hidrogeológicos- Ambientales, que se muestran en la tabla 2, siendo fundamentales en la interpretación de los valores de resistividad proporcionados por los SEV's.

Tipo de rocas	Resistividad (Ohm-m)
Ígnea	
Granito	5,000 - 1,000,000
Granito alterado	1,500 - 10,000
Granito muy alterado	100 - 600
Toba	15-70
Sedimentarias	
Areniscas	60 - 8,000
Lutita	20 - 2,000
Arenas con humedad	30 - 400
Arena seca	1,000 - 10, 000
Arcilla	1 - 100
Arcilla seca	30
Arcilla húmeda	5-10
Aluviones y arenas	10 - 800
Gravas	50 - 1,000
Gravas saturadas	100
Conglomerado	100 - 10,000
Suelo	50 - 100
Caliza	100-10,000

Agua	10 - 100
Agua de mar	0.2
Arena arcillosa	50 - 500
<b>Metamórficas</b>	
Pizarra	60 - 40,000
Mármol	100 - 250,000
Cuarcita	100 - 200,000
Gneis	100 -10,000

Tabla 2.-Tabla de rango de valores de resistividad de las rocas y minerales (Autorizada y modificada de BELMONTE Servicios Geofísicos-Hidrogeológicos- Ambientales).

### 3.3 Ecuaciones gobernantes del método de prospección Geoeléctrica.

Partiremos de las ecuaciones de Maxwell, que son las que explican el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

Donde:

**B** es el campo de inducción magnética (**T**).

**H** es la intensidad de campo magnético (**A/m**).

**J** es la densidad de corriente (**A/m<sup>2</sup>**).

**E** es el campo eléctrico (**V/m**).

**D** es el campo de desplazamiento eléctrico (**C/m<sup>2</sup>**).

**t** es el tiempo (**s**).

Que, por tratarse de un campo estacionario (cargas que no varían con el tiempo), se anularán las derivadas de tiempo y entonces quedarán como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (6)$$

Se usará la ecuación (5) porque ésta muestra que el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  es estacionario ya que es constante y no depende el tiempo, y se describe mediante el gradiente de un potencial escalar  $U$  estacionario conocido como potencial eléctrico, quedando en su forma diferencial:

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (7)$$

El campo eléctrico  $\mathbf{E}$  debe cumplir con la Ley de ohm para campos eléctricos en medios isótropos, esta ley fundamental es usada en estudios de resistividad ya que rige el flujo de corriente en el subsuelo expresado de la forma:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (8)$$

Donde:

$\mathbf{J}$  es la densidad de corriente.

$\sigma$  es la conductividad del medio.

$\mathbf{E}$  es el campo eléctrico.

La ecuación (8) nos dice que la densidad de corriente  $\mathbf{J}$  en un punto tiene la misma dirección y sentido que el campo  $\mathbf{E}$ .

Por lo anterior se cumplirá la ecuación de continuidad en todos los puntos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (9)$$

Al eliminar la derivada de tiempo se reduce a:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (10)$$

Que será válida en todo el semi espacio exceptuando los electrodos.

Al relacionar la ecuación que describe el flujo de corriente **(8)** con la ecuación de continuidad de un campo eléctrico estacionario **(10)**, da como resultado:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0 \quad (11)$$

Desarrollando la ecuación queda:

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = \sigma \nabla \cdot \mathbf{E} + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla^2 U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = 0 \quad (12)$$

Para una región homogénea e isotrópica, por lo tanto:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (13)$$

Obteniendo así la ecuación de Laplace, la cual será válida en todo el semi espacio conductor, exceptuando en los electrodos; la ecuación **(13)** indica que, a lo largo de cada superficie equipotencial, la corriente  $\mathbf{J}$  es la misma, la forma de flujo de las corrientes es radial respecto a la fuente.

### 3.4 Resistividad Aparente.

La resistividad aparente, es la variable experimental que expresa los resultados de las mediciones en la mayoría de los métodos geoelectricos, esta variable no es el promedio de los valores de resistividad ( $\rho$ ) obtenidos del subsuelo, sino que cada valor de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) es una medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo empleado y de la distribución real de la resistividad.

Al calcular el factor geométrico  $k$  se obtiene la localización del punto al cual se le atribuye el valor de resistividad aparente, a éste se le conoce como punto de atribución.

El punto de atribución resulta ser el punto del terreno a cuya vertical deben atribuirse los datos obtenidos por el SEV, es decir que cuando se realiza una medición en campo se obtiene un valor puntual de la resistividad aparente y a dicho valor se le asigna una ubicación en el subsuelo tomándose el centro  $O$  del dipolo  $MN$ , pero no debe olvidarse que la medición está influida por un volumen de terreno más o menos grande (Orellana,1982).

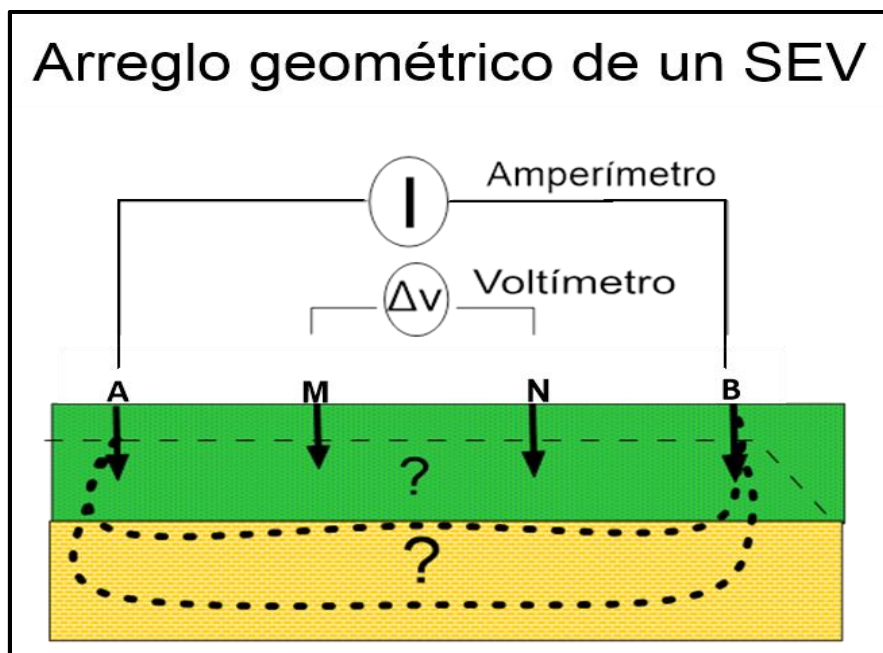
Para graficar e interpretar los datos de resistividad aparente será necesario una hoja bi-log en el eje vertical y horizontal debido a la variación que presenten los valores de resistividad durante el trabajo de campo en el área de estudio (rango de valores entre 0 y mayores a 10, 000).

### **3.5 Sondeos eléctricos verticales.**

El método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), se conoce como una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción (Orellana, 1982), en cuyas mediciones de campo se mantiene fijo el punto central del dispositivo y se incrementan las separaciones entre electrodos para obtener información sobre sectores más profundos del subsuelo (Koefoed, 1979).

Durante la ejecución de un SEV, en las configuraciones de adquisición, dos electrodos son usados para energizar el suelo **AB** y dos electrodos para medir la diferencia de potencial **MN**, la correlación entre la corriente inyectada, la diferencia de potencial medida y un coeficiente geométrico relativo a la disposición de los 4 electrodos determina el valor de la resistividad aparente en el sitio. La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado. La mayor limitación del método de SEV's es que las variaciones horizontales (o laterales) de la resistividad (figura 15) son prácticamente ignorados (Loke, 2004).

En aspectos geohidrológicos brindan información para determinar las estructuras geológicas principales que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea, y por defecto poder recomendar áreas favorables para la explotación de agua subterránea (SIAPA, 2014). En la figura 14, se presenta el modelo de un SEV.



**Figura 14.-**Modelo de un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), donde a medida que se abre la distancia AB, Aumenta la profundidad de investigación (imagen editada modificada de Sánchez, 1987).

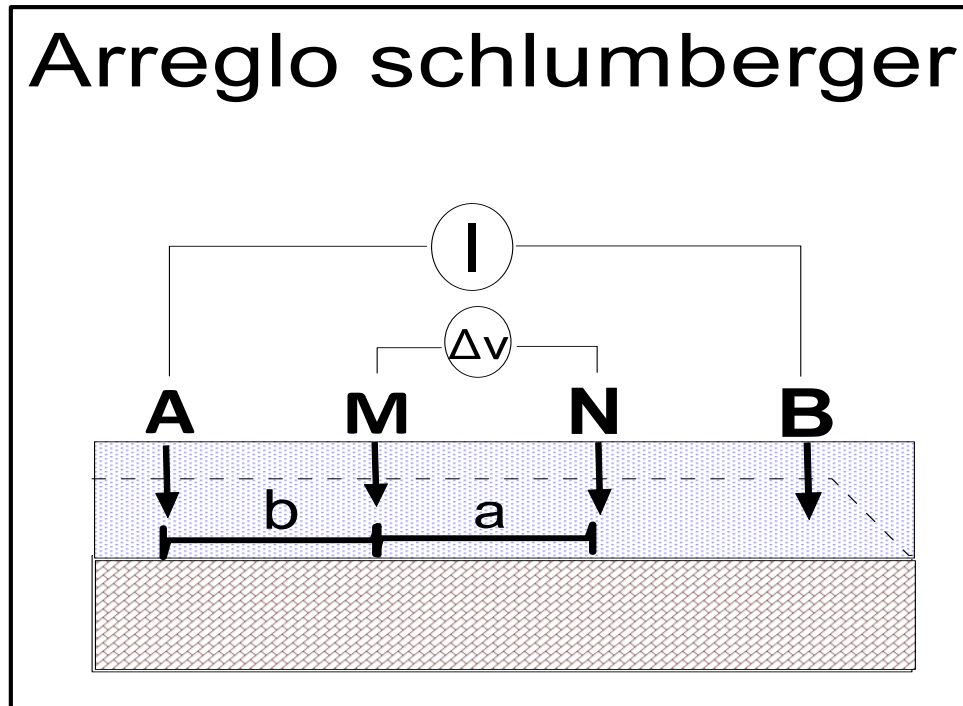
Para su interpretación se asume normalmente que el subsuelo está constituido por capas horizontales, homogéneas e isotrópicas, en cuyo caso, la resistividad del subsuelo varía sólo con la profundidad, pero no en la dirección horizontal, es decir, la interpretación es efectuada mediante modelos en una sola dimensión (Loke, 2004).

### 3.5.1 DISPOSITIVO SCHLUMBERGER.

Los SEV's Schlumberger son la configuración más favorecida, si el área de estudio está comprendida de capas horizontales, homogéneas e isotrópicas; en la realidad los datos están influenciados por la falta de homogeneidad vertical, horizontal y del diseño del campo (Bhattacharya et al., 2016).

En el arreglo Schlumberger se colocan 4 electrodos en línea alrededor de un punto medio en común; la disposición de los electrodos consiste en 2 electrodos de corriente **AB** en los extremos y dos electrodos de potencial **MN** en el interior (figura 15), como regla general la distancia entre los electrodos **M** y **N** deberá ser igual o menor que un quinto de la distancia entre los electrodos **A** y **B**, dónde varía según la intensidad de la señal, sin

embargo para valores muy grandes de  $AB > 5MN$ , el potencial medido entre los electrodos  $MN$  puede ser demasiado pequeño para una medición confiable, y se efectúa un empalme para aumentar la señal medida, efecto muy común en el arreglo Schlumberger (Bhattacharya et al., 2016).



**Figura 15.-**Modelo del arreglo electródico Schlumberger (imagen modificada del “MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO”, CONAGUA, 2007).

Con el dispositivo Schlumberger los valores de resistividad aparente ( $\rho_a$ , en  $\Omega \cdot m$ ) se calculan habitualmente mediante la ecuación (14), que es la siguiente:

$$\rho_a = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2) \frac{\Delta V}{I} \quad (14)$$

En la que  $\Delta V$  es la diferencia de potencial entre los electrodos  $M$  y  $N$ , en (mV), cuando por el circuito de emisión circula una corriente  $I$ , en (mA), dependiendo de la configuración de las unidades, es decir que puede ser medido  $\Delta V$  en Volts y corriente  $I$  en Amperes.

### 3.6 Factor Geométrico.

Utilizando el teorema de la superposición que describe Milsom (2003) de los campos eléctricos dará como resultado la ecuación (15):

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (15)$$

De la misma forma, se aplica en el punto N y se tendrá la ecuación (16):

$$U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (16)$$

Y entonces la diferencia de potencial entre los puntos M y N dará la ecuación (17):

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \right] - \left[ \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (17)$$

Al despejar la resistividad  $\rho$ , la ecuación (18) queda como:

$$\rho = \frac{2\pi}{\left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \right] - \left[ \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]} \cdot \frac{\Delta U}{I} = k \frac{\Delta U}{I} \quad (18)$$

Donde el factor geométrico ( $k$ ) resulta ser una función dependiente del tipo de dispositivo empleado y se determina por la distancia entre los electrodos del dispositivo y viene dado por la ecuación (19):

$$k = \frac{2\pi}{\left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \right] - \left[ \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]} \quad (19)$$

La ecuación (18), aplica para un medio homogéneo, aunque también se puede aplicar en la interpretación de los resultados de una medición hecha en la superficie de un terreno heterogéneo, es decir, se adquiere una magnitud parcial de la resistividad, a esta magnitud parcial se le conoce como resistividad aparente.

### **3.7 Empalme.**

Existe una complicación cuando se realiza un SEV sobre extensiones de terreno muy grandes, especialmente al trabajar con un arreglo Schlumberger, esto es que la intensidad de la señal no es lo suficientemente fuerte para alcanzar a medir la resistividad del subsuelo cuando la separación de los electrodos **AM** es demasiado grande.

Un empalme consiste en aumentar la separación entre los electrodos de potencial **MN** (caso del arreglo Schlumberger) justo cuando la separación entre **AB** es demasiado grande de esta manera se intensifica la señal transmitida y se puede obtener un valor de resistividad con menor rango de error (Vences, 2013).

### **3.8 Ventajas y desventajas del arreglo Schlumberger.**

Una de las ventajas del arreglo Schlumberger es que necesita menos electrodos para efectuar medición y longitud de cables comparado con el arreglo Wenner, además es mejor arreglo en comparación al Wenner en cuanto a resolución para encontrar la anchura, espesor, profundidad y resistividad aparente del cuerpo (Flores, 2016).

### **3.9 Corte Geoeléctrico.**

Un SEV puede realizarse sobre cualquier combinación de formaciones geológicas, pero para que la curva de resistividad aparente obtenida sea interpretable, se asume que el subsuelo está constituido por capas horizontales y homogéneas y para que los resultados sean aprovechables se parte del supuesto de que el medio en que se realizan las mediciones está compuesto por al menos dos semi espacios separados por una superficie plana horizontal (Cantos, 1974).

El semiespacio superior de conductividad nula representa la atmósfera, el segundo representa el terreno y está conformado por capas homogéneas e isótropas, de extensión lateral “infinita” y separadas entre sí por superficies paralelas al plano aire – terreno donde

la conductividad como se muestra en la figura 18 variaría de acuerdo con la composición de cada capa.

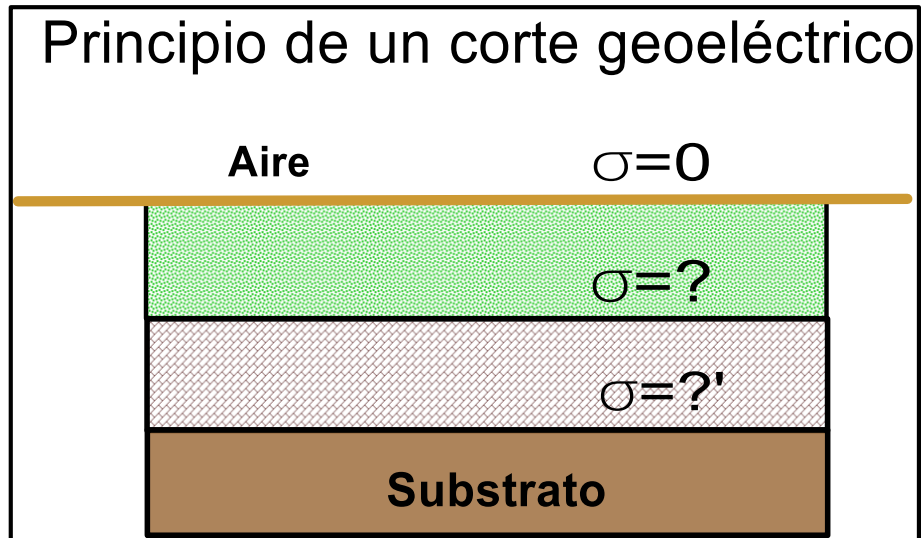
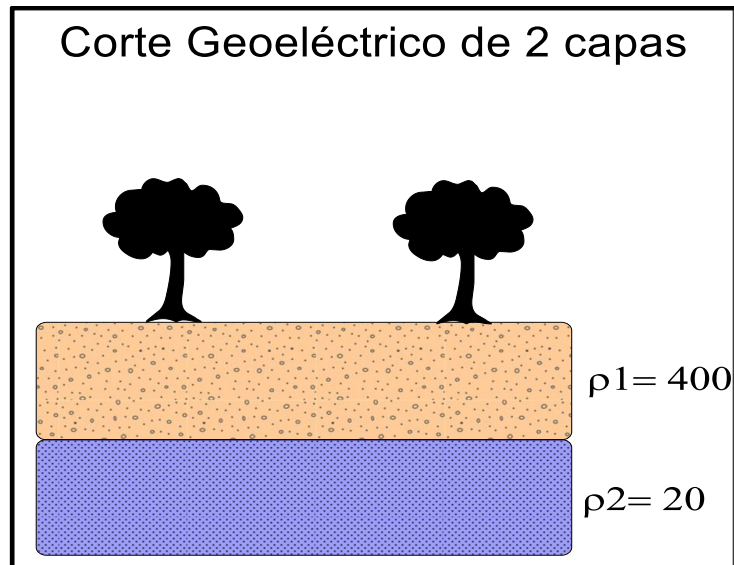


Figura 16.-Modelo del principio de un corte geoelectrico (Modificado de Cantos, 1974).

Los cortes geoelectricos pueden clasificarse atendiendo al número de capas que los componen, los cortes del mismo número de capas pueden subdividirse según el orden en que aparezcan, en los sucesivos contactos, resistividades mayores o menores que en la capa suprayacente.

Para el uso más eficiente de esta clasificación, es muy conveniente establecer algún sistema de notación. Emplearemos aquí la seguida por autores soviéticos introducida hace unos años y que aún en la actualidad siguen siendo utilizadas (Orellana y Money, (1996); Keller y Frischknecht (1966); Bhattacharya y Patra (1968), y otros).

La notación es la siguiente: Los cortes de dos capas, de los cuales existen dos tipos ( $p_1 < p_2$  y  $p_1 > p_2$ ) no llevan símbolo especial como se muestra en la figura 17.



**Figura 17.-**Modelo geoelectrico de 2 capas (Recuperado y modificado de Cantos, 1974).

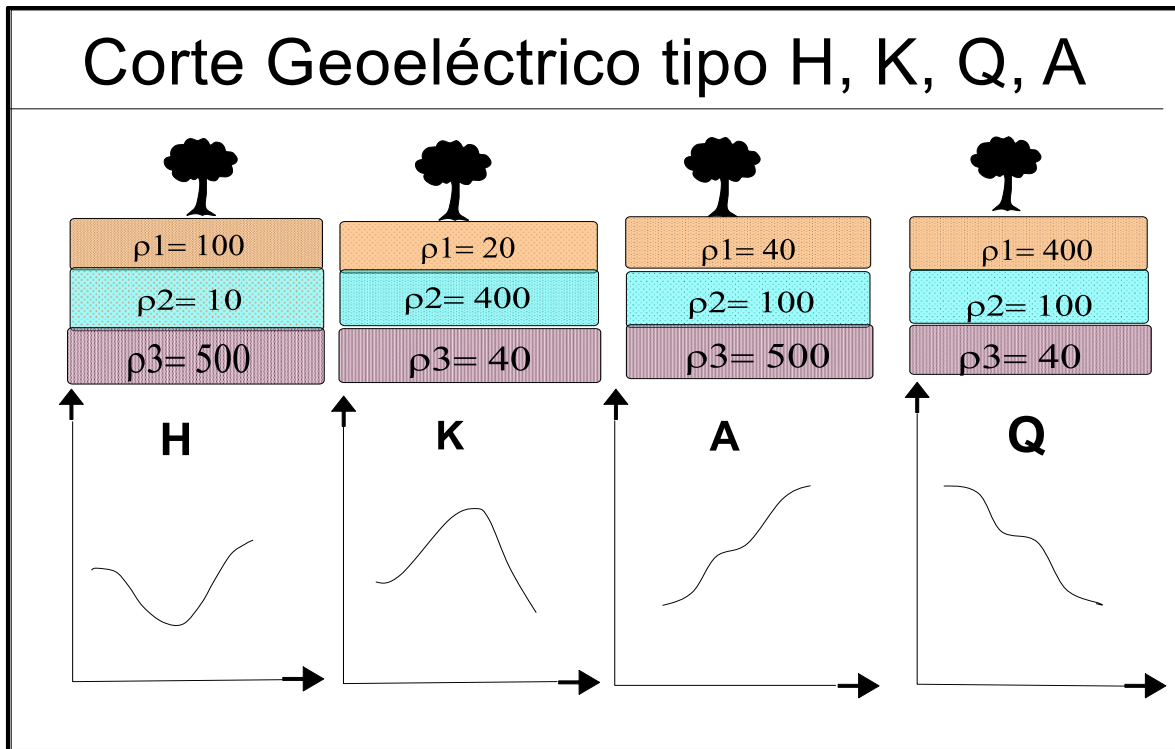
La figura 18 muestra las letras latinas (H, K, Q, A), que representan respectivamente los cuatro tipos posibles para cortes geoelectricos de tres capas que son:

1.- Tipo H:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

2.- Tipo K:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

3.- Tipo Q:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

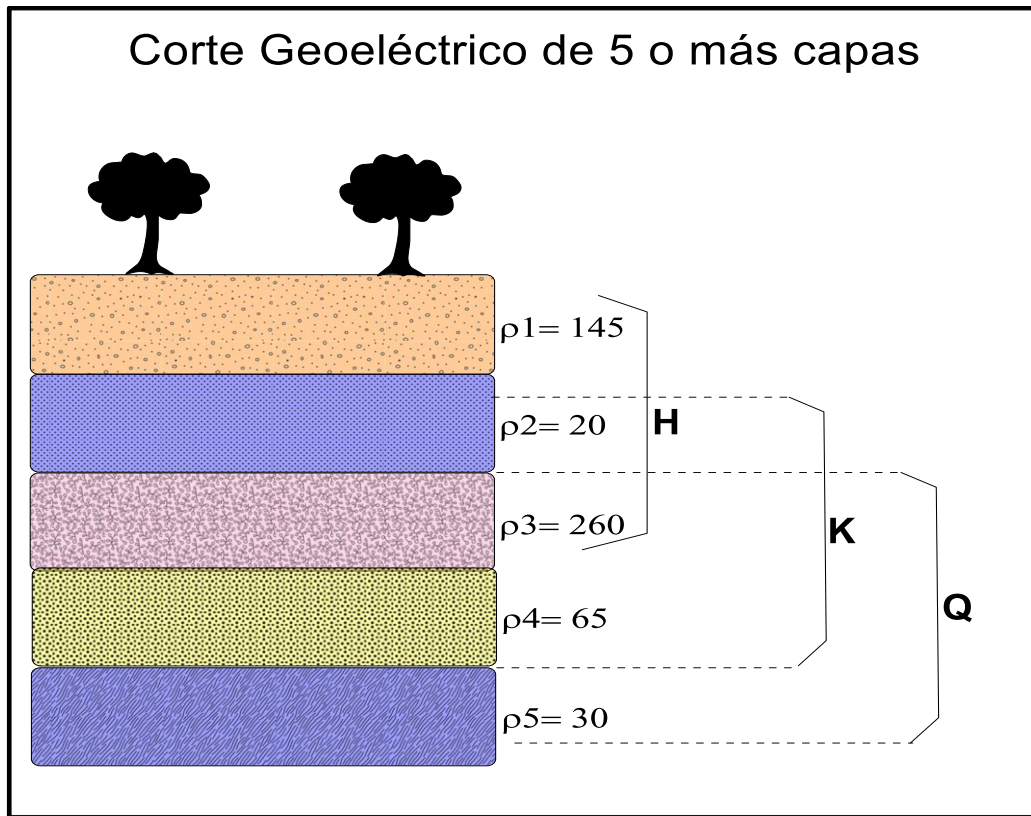
4.- Tipo A:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ .



**Figura 18.-**Modelo y gráfica de los cortes geoelectricos Tipo H, K, A, Q (Recuperado y modificado de Cantos, 1974).

Los cortes de cuatro capas se distribuyen en 8 grupos, que se designan como combinación de los anteriores; para ello se consideran las tres primeras capas y se le asigna la letra correspondiente de la lista anterior; luego se hace lo propio con las tres últimas capas, así, el tipo AA corresponde a la combinación de resistividades  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$  y el HK a  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$ . Sólo son posibles los tipos siguientes: HK, HA, KH, HQ, QQ, QH, AK, AA.

Los cortes de cinco o más capas se simbolizan siguiendo el mismo método de la figura 18, donde se consideran en primer lugar las tres primeras capas y se les asigna la letra correspondiente como en la figura 19; luego se hace lo mismo con las capas segunda, tercera y cuarta, después con la tercera, cuarta y quinta.



**Figura 19.-**Modelo de los cortes geoelectricos de 5 o más capas (Modificado de Cantos, 1974).

## CAPÍTULO 4 - METODOLOGÍA

### 4.1 Instrumentación Geofísica.

Para la ejecución e interpretación de los SEV's se necesitaron las siguientes herramientas:

1.- Computadora

2.-GPS

3.-Programa WORD®, EXCEL®, ZONDIP1D®, SURFER®, ARCGIS®, Google Earth®.

4.-2 carretes (Marcas para Schlumberger), 2 carretes de corriente con alcance de 300 metros cada uno y 2 de potencial con alcance de 300 metros cada uno

5.- 3 mazos

6.- Paquete (mínimo 20 piezas) de electrodos de acero inoxidable

7.- Libreta de campo

8.- 3 Radios

9.- Un resistímetro propiedad de la empresa BELMONTE Servicios Geofísicos-Hidrogeológicos- Ambientales

El equipo que se utilizó para poder conocer la resistividad aparente del subsuelo consta de un transmisor de corriente directa, cuya fuente es un generador de corriente alterna (CA) que se rectifica para convertirla en corriente directa CD e inyectarla al subsuelo o una batería de auto de 12V, un receptor de alta impedancia de entrada complementa el equipo básico de exploración.

La figura 20, muestra el equipo utilizado para realizar los SEV's, en la parte superior izquierda se observa el equipo montado en la zona de estudio y las flechas señalan las componentes individuales del equipo.



**Figura 20.-** Equipo de resistividad utilizado para realizar el estudio geoelectrico (SEV's) en la localidad de Santa María Huamelula, perteneciente al municipio de San Pedro Huamelula, Oaxaca.

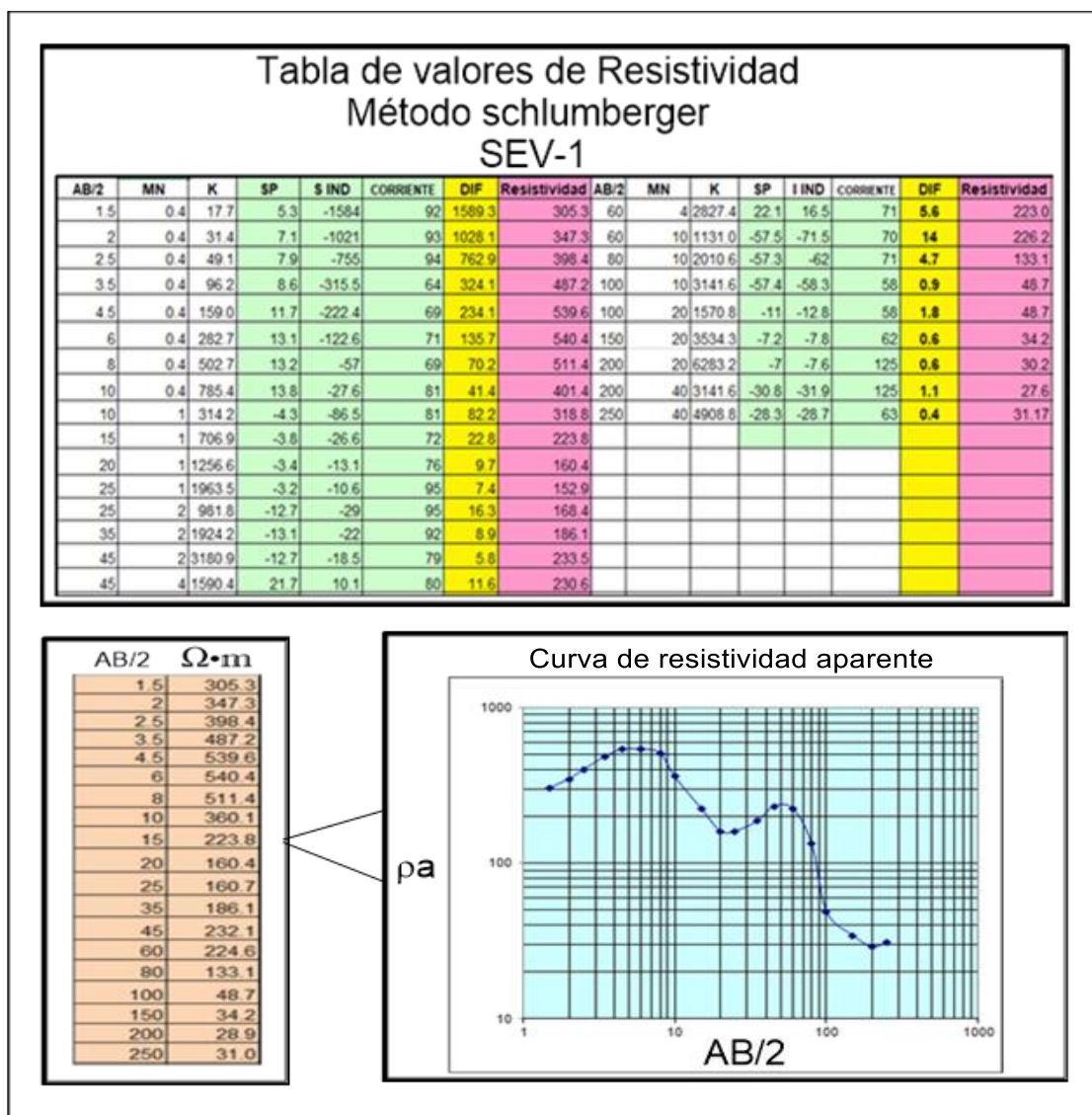
## 4.2 Adquisición de datos de campo.

- 1.- Primero, se eligió el lugar de los SEV's de acuerdo con las características topográficas del lugar y de las necesidades de los ciudadanos locales.
- 2.- Se utilizó una estaca de hierro como punto central para cada uno de los SEV's con arreglo Schlumberger.
- 3.- Se buscó un punto de orientación para asegurar su linealidad
- 4.- Después se procedió a la toma de datos de potencial natural, potencial inducido y corriente conforme a la distancia  $AB/2$ .

5.- Se anotaron los datos proporcionados por el dispositivo en el formato Excel, procediendo a multiplicar por la constante  $K$  el cociente entre las lecturas de diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) y corriente ( $I$ ) para obtener la resistividad aparente en cada punto.

6.- Simultáneamente después de anotar los datos, en una gráfica escala bilogarítmica se graficaron los datos de resistividad aparente contra la distancia  $AB/2$ , con el fin de conocer el comportamiento de los materiales del subsuelo ante mencionada resistividad.

En la figura 21, se presenta ejemplo de la tabulación de las mediciones del estudio geoelectrico en Santa María Huamelula del SEV-1 con grafica de resistividad aparente.



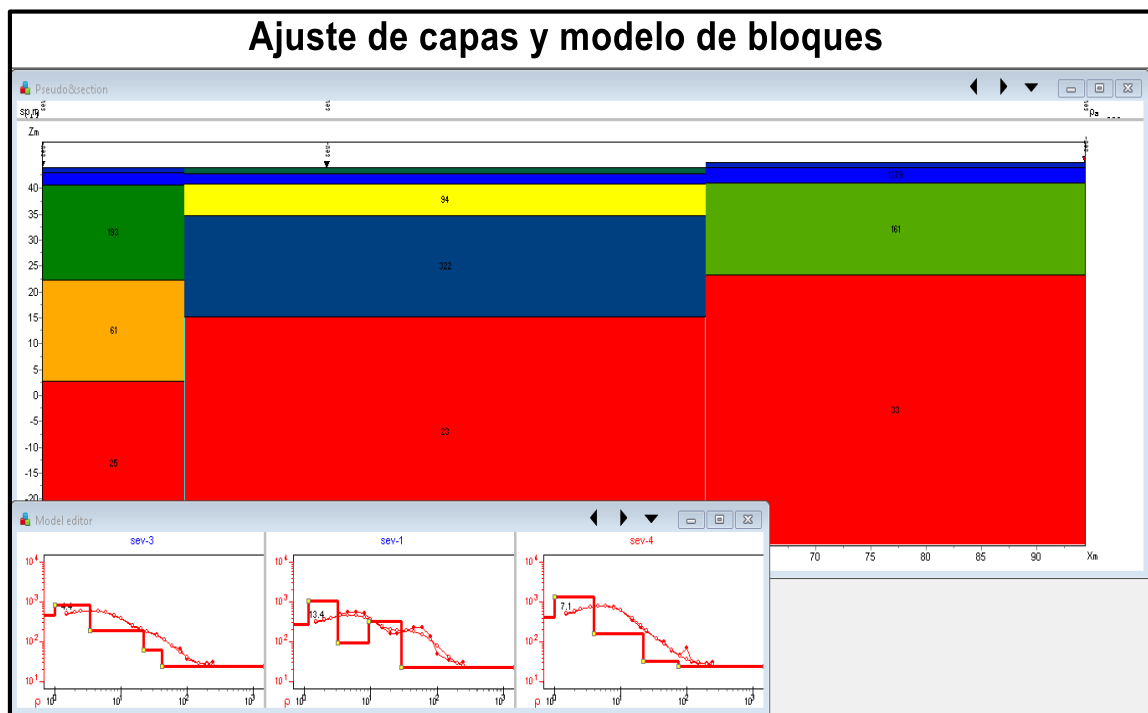
**Figura 21.-** En la parte superior se observa la hoja de cálculo de la resistividad aparente, en la parte inferior izquierda los valores correspondientes de la resistividad aparente con respecto a  $AB/2$  y en la parte derecha la curva de resistividad aparente del SEV#1.

### 4.3 Procesamiento de datos geofísicos (Software).

El software utilizado para el procesamiento de los datos del estudio geoelectrico fue el ZONDIP1D ® (2012), donde los datos de los SEV's son introducidos y procesados con base en el modelado directo de datos de curvas de resistividad aparente.

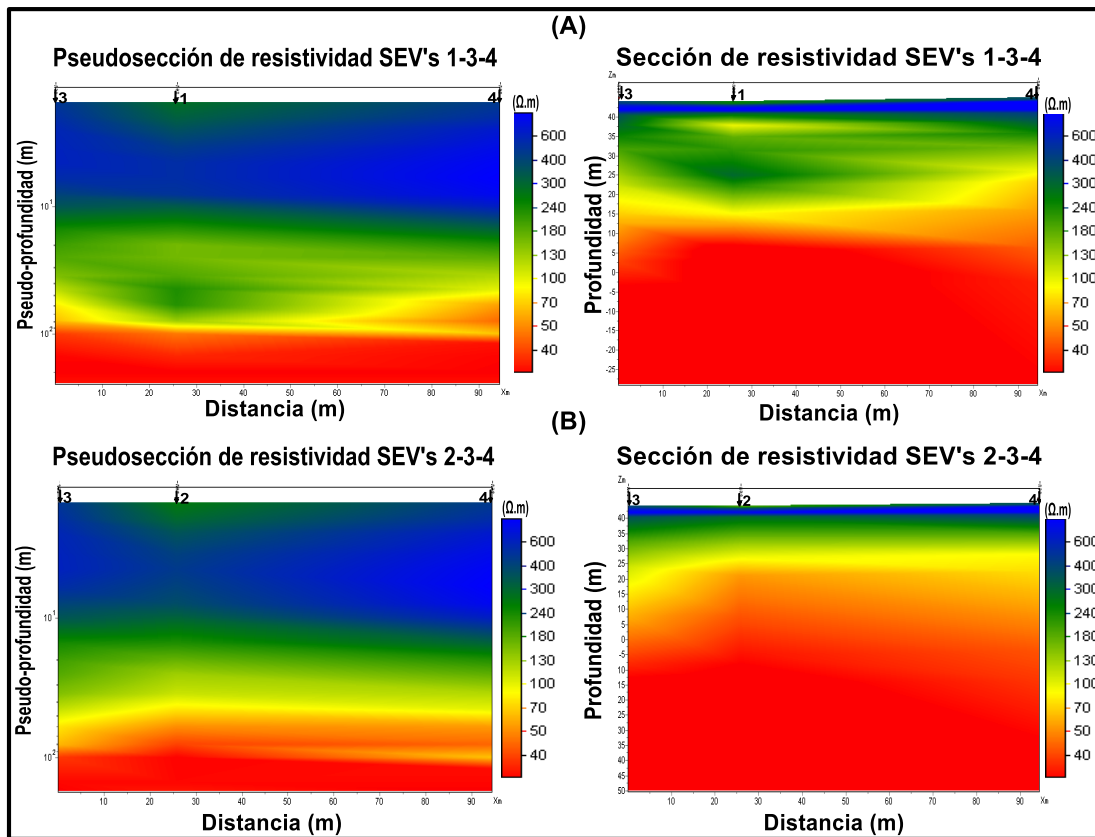
El software genera un modelo de capas del subsuelo en una dimensión, y a partir de la interpolación de estos modelos, el software genera una pseudosección, así como una sección bidimensional en la que se observa la profundidad y valores de resistividad verdaderos de las capas de los materiales que componen el subsuelo como se muestra en la figura 22.

Con las interpretaciones del número de capas y sus espesores correspondientes, se obtiene un error cuadrático medio (RMS) acorde al ajuste del modelo tomado en campo (Curva de resistividad aparente), que indica que porcentaje se ajustó el modelo de los datos de la resistividad real respecto a los datos de resistividad aparente.



**Figura 22.-**Modelo de bloques en la parte superior y ajuste de Capas parte inferior mediante el software ZONDIP1D 2012.

En la figura 23 se observan a detalle los resultados del software de acuerdo con el resultado de la interpolación de los Sondeos eléctricos (SEV's), en la figura se observan perfiles de pseudosección y secciones geoelectricas con base en el ajuste de curvas de resistividad aparente.



**Figura 23.-** Se observan la pseudosección y sección de resistividad de 2 perfiles. El (A) que se encuentra en la parte superior muestra los resultados de la interpolación de los SEV's 1-3-4, en la parte inferior (B) se muestran los resultados de la interpolación de los SEV's 2-3-4. Los colores más azules representan los materiales más duros y resistentes, los rojos los más blandos y conductores.

Posteriormente, con el software SURFER se caracteriza el terreno con base al modelo de resistividades generado en ZONDIP1D (Modelo de capas y Sección geoelectrica) correlacionadas con las resistividades de las tablas ocupadas (BELMONTE Servicios Geofísicos-Hidrogeológicos- Ambientales), la correlación y la caracterización dan como resultado una idea de la distribución de los materiales que componen el subsuelo.

# CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E INTERPRETACIONES

## 5.1 Modelo de capas.

A continuación, se presentan los modelos de capas de los sondeos eléctricos verticales procesados, donde se observa la curva de resistividad aparente observada y calculada, la curva de resistividad real con su respectivo error RMS (%) y su clasificación de acuerdo con la clasificación de los cortes geoelectricos de Orellana y Money, 1996; Keller y Frischknecht, 1966; Bhattacharya y Patra 1968, y otros.

En la figura 24 se muestra las gráficas del ajuste de los valores de la resistividad real (resistividad calculada), respecto a la gráfica de los valores de resistividad aparente, correspondientes al SEV-1, resultando un error RMS de 13.4%.

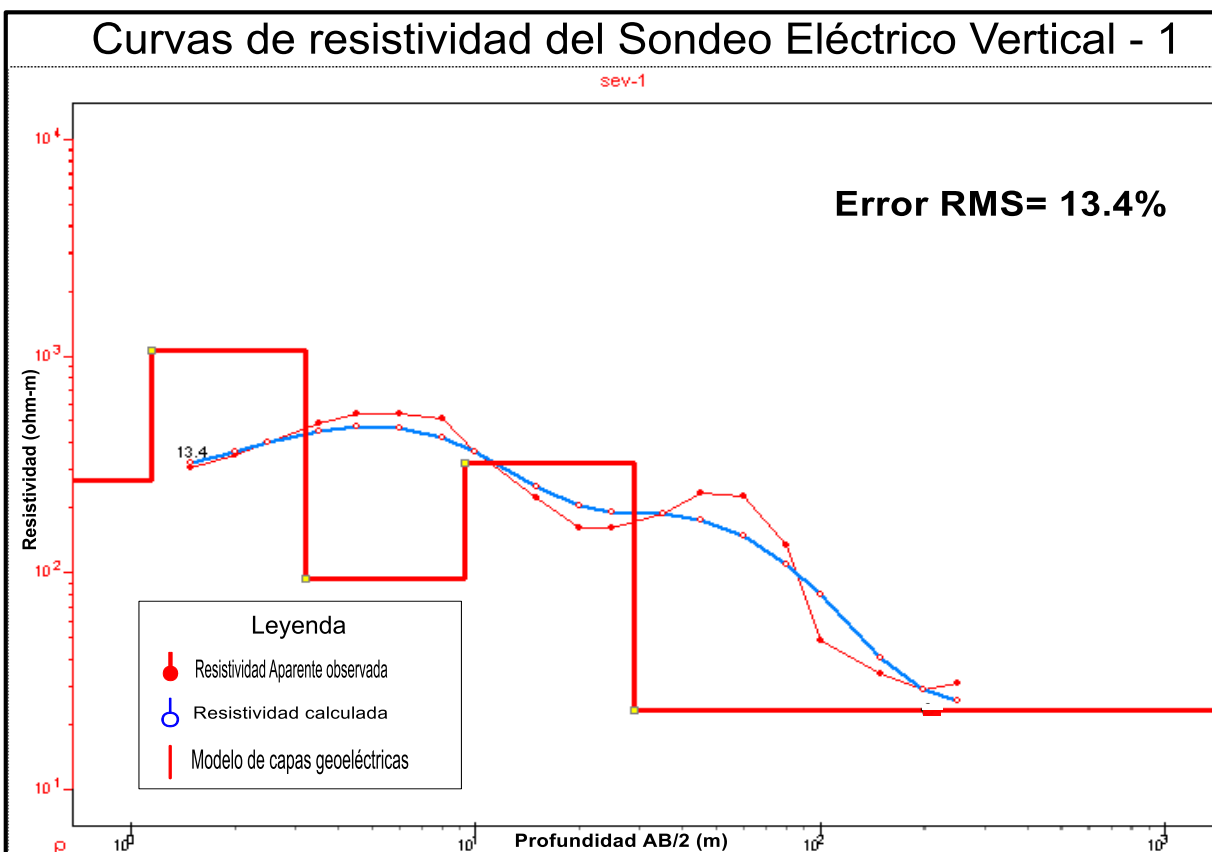


Figura 24.-Ajuste de curvas de resistividad y error RMS del modelo de capas SEV - 1(Perfil Generado en ZOONDIP1D).

La interpretación de los puntos de inflexión de la gráfica respecto a la variación de resistividades en el subsuelo nos indica un número determinado de capas con un determinado espesor a una cierta profundidad mostrados en la tabla 3.

**Tabla 3** .- Muestra las Profundidades resultantes por el modelo con su respectiva resistividad para el SEV-1. Donde N= Número de capa,  $\rho$ = Resistividad (Ohm-m), h= Espesor (m), z=Profundidad donde inicia la capa (m).

<b>N</b>	<b><math>\rho</math></b>	<b>h</b>	<b>z</b>
1	269	1	0
2	1066	2	1
3	94	6	3
4	322	20	9
5	23		29

Una vez conocido el número de capas que indica la interpretación del SEV, se clasifica el corte geoelectrico con base en el comportamiento de la resistividad que presentan las capas.

El SEV- 1 mostrado en la figura 24, indica un corte geoelectrico tipo **KQH**, donde:

$$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 = K$$

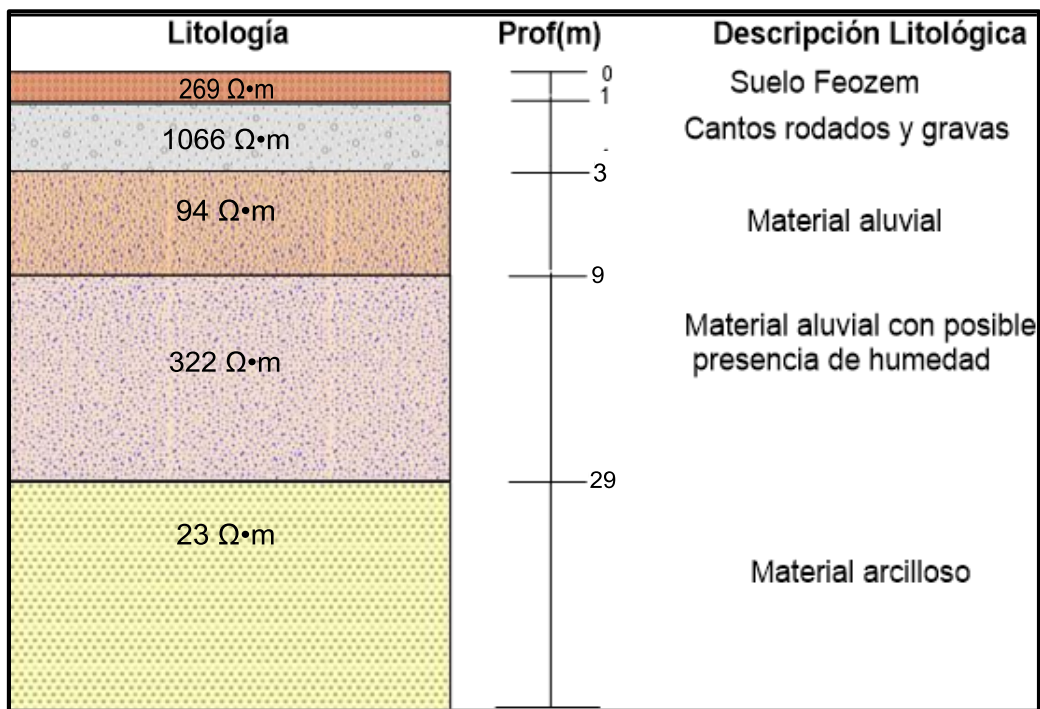
$$\rho_2 > \rho_3 < \rho_4 = H$$

$$\rho_3 < \rho_4 > \rho_5 = K$$

### Interpretación del SEV-1:

Se infirieron 5 unidades litológicas con base a la distribución de la resistividad en el subsuelo como se muestra en la figura 25. La primera capa tiene una resistividad de **269 $\Omega$ •m** y un espesor de **1m** asociada a suelo tipo **Phaeozem**. La segunda capa tiene una resistividad de **1066 $\Omega$ •m** y tiene un espesor de **3m**, correspondientes a **cantos rodados de gran tamaño y gravas**.

La tercera capa tiene una resistividad de **94Ω•m** asociada a **material aluvial** la capa tiene un espesor de aproximadamente **23m** con posibilidades de almacenar agua. La cuarta capa tiene una resistividad de **322Ω•m** y un espesor de **47m**, la cual se asocia a **material aluvial de granulometría más gruesa con presencia de humedad**, ésta capa tiene una gran probabilidad de almacenar agua. La quinta capa comienza a una profundidad de **74m** y con posible presencia de material aluvial fundamentalmente **arcilloso**, tiene una resistividad de **23Ω•m** con pocas posibilidades de almacenar y transmitir agua.



**Figura 25.-**Litología del corte geoelectrico correspondiente al SEV-1 y su descripción litológica.

En la figura 26 se muestra las gráficas del ajuste de los valores de la resistividad real (resistividad calculada), respecto a la gráfica de los valores de resistividad aparente correspondientes al SEV-2, resultando un error RMS de 4.2%. En la tabla 4, se muestran los valores resultantes de resistividad con base al procesamiento de datos de resistividad, donde se observa el número de capas, resistividad calculada, espesor y profundidad a la que inicia la capa.

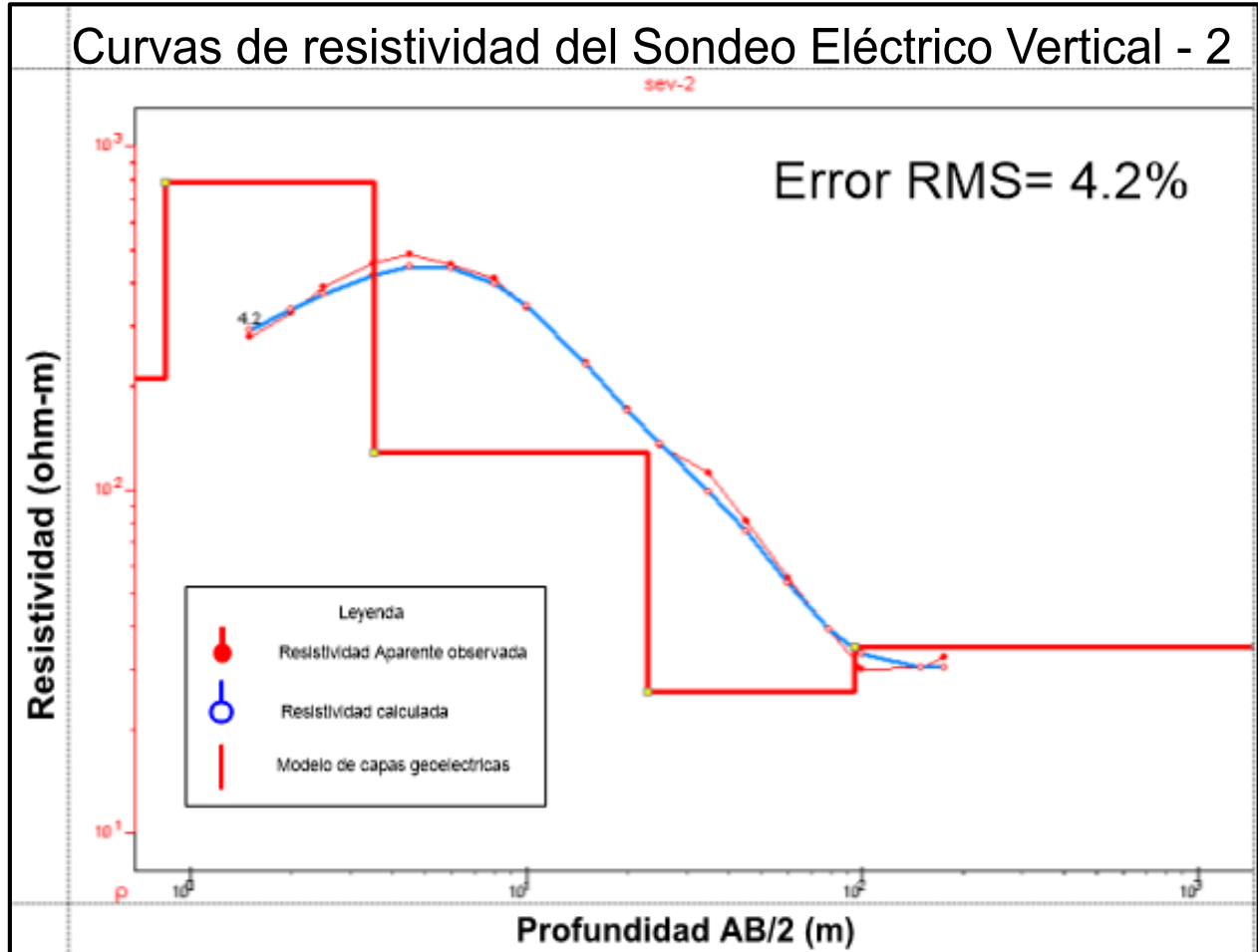


Figura 26.-Ajuste RMS del modelo de capas SEV -2 (perfil Generado en ZOONDIP1D).

Tabla 4 Profundidades resultantes por el modelo con su respectiva resistividad del SEV-2. N= Número de capa,  $\rho$ = Resistividad (Ohm-m), h= Espesor (m), z=Profundidad donde inicia la capa (m).

N	$\rho$	h	Z
1	210	1	0
2	784	3	1
3	128	19	4
4	26	71	23

5	35		94
---	----	--	----

El SEV-2 mostrado en la figura 26, indica un corte geoelectrico tipo **KQH**, donde:

$$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 = K$$

$$\rho_2 > \rho_3 > \rho_4 = Q$$

$$\rho_3 > \rho_4 < \rho_5 = H$$

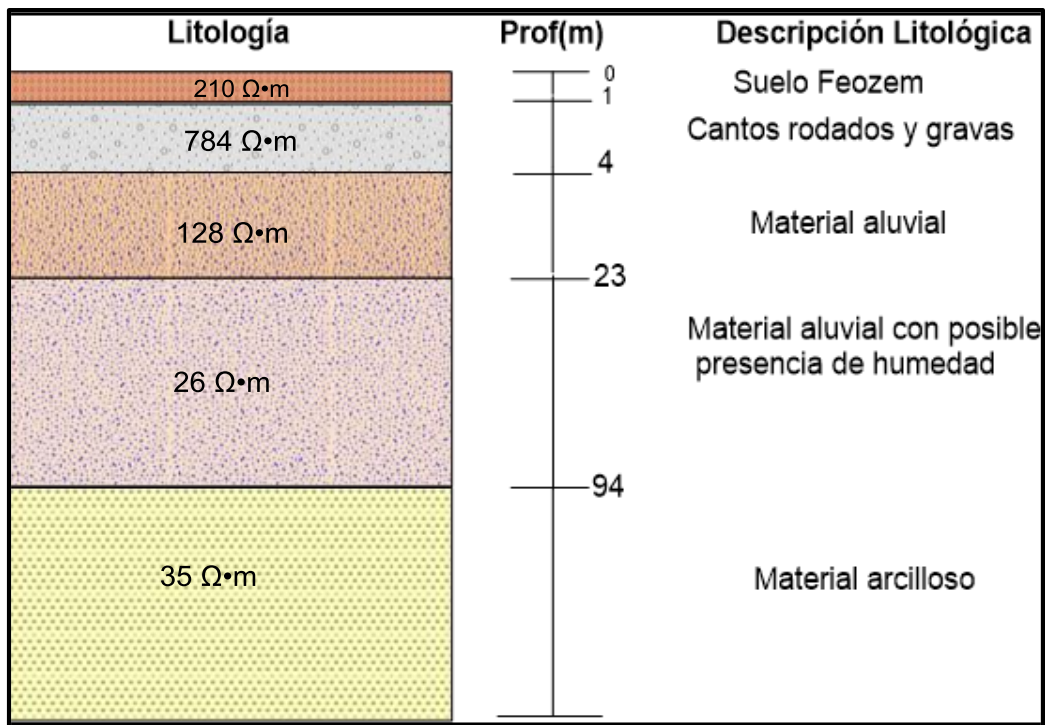
### Interpretación del SEV-2:

Se infirieron 5 unidades litológicas con base a la distribución de la resistividad en el subsuelo descrito en la figura 27. La primera capa tiene una resistividad de **210Ω•m** y un espesor de 1m, está asociada a suelo tipo **Phaeozem**. La segunda capa tiene una resistividad de **784Ω•m** y tiene un espesor de **3m**, el posible material al que corresponde son **cantos rodados y gravas de gran tamaño**. La tercera capa tiene una resistividad de **128Ω•m** asociada a **material aluvial** con poca posibilidad de tener agua, contiene un espesor de aproximadamente **19m**. La cuarta capa comienza a una profundidad de **23m** y existe la presencia de **material aluvial con posible presencia de humedad**, tiene una resistividad de **26Ω•m**, su espesor aproximado es de 71m. La quinta capa comienza a una profundidad de **94m** y existe la presencia de **material arcilloso**, tiene una resistividad de **35Ω•m** con pocas posibilidades de contener agua.

Es común que una "unidad geológica" esté constituida por rocas con diferentes resistividades, y que una capa con la misma resistividad comprenda diferentes tipos de roca. La distribución de resistividades no se comporta igual, cuando existe anisotropía en el sentido vertical, en sentido horizontal o en ambos lo cual puede hacer confusa la

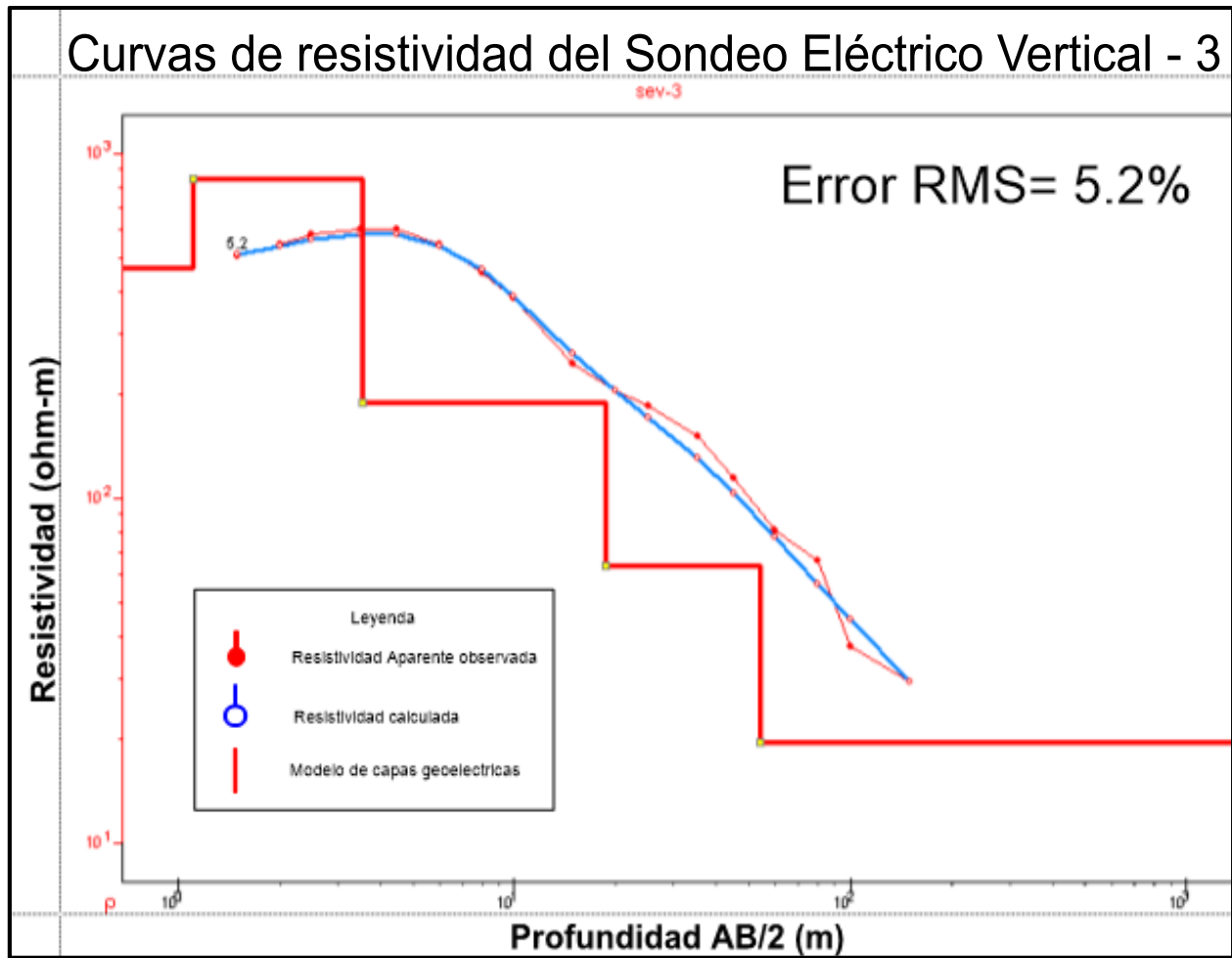
interpretación como es el caso de los SEV's 1 y 2, donde las lecturas fueron tomadas en sentidos perpendiculares respectivamente.

Las relaciones de comportamiento de la resistividad con la anisotropía son difíciles de establecer, y mucho más generalizarlas (Del valle, 1984) y se atribuyen a la heterogeneidad del subsuelo. En la figura 27 se describe la litología del SEV-2 con base a los resultados mostrados en la tabla 4.



**Figura 27.-**Litología del corte geoelectrico correspondiente al SEV-2 y su descripción litológica.

En la figura 28 se muestra las gráficas del ajuste de los valores de la resistividad real (resistividad calculada), respecto a la gráfica de los valores de resistividad aparente correspondientes al SEV-3, resultando un error RMS de 5.2%. En la tabla 5 se muestran los valores resultantes de resistividad con base al procesamiento de datos de resistividad, donde se observa el número de capas, resistividad calculada, espesor y profundidad a la que inicia la capa.



**Figura 28.-**Ajuste RMS del modelo de capas SEV -3 (Perfil Generado en ZOONDIP1D).

**Tabla 5** Profundidades resultantes por el modelo con su respectiva resistividad del SEV-3. N= Número de capa,  $\rho$ = resistividad (Ohm-m), h= espesor (m), z=profundidad donde inicia la capa (m).

N	$\rho$	h	Z
1	464	1	0
2	842	2	1
3	189	15	3
4	63	35	18
5	18		53

El SEV-3 mostrado en la figura 28 indica un corte geoelectrico tipo **KQQ**, donde:

$$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$$

$$\rho_2 > \rho_3 > \rho_4$$

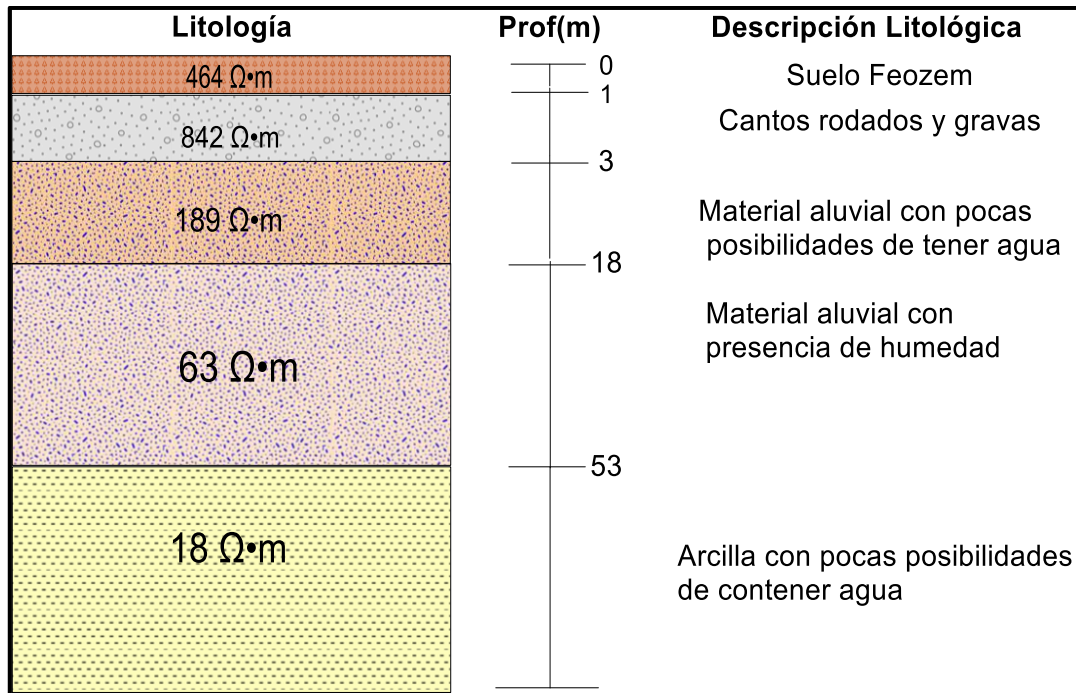
$$\rho_3 > \rho_4 > \rho_5$$

### **Interpretación del SEV-3:**

En la figura 29 se describe la litología del SEV-3 con base a los resultados mostrados en la tabla 5. Se infirieron 5 unidades litológicas con base a la distribución de la resistividad en el subsuelo.

La primera capa tiene una resistividad de **464Ω•m** y un espesor de **1m**, está asociada a suelo tipo **Phaeozem**. La segunda capa tiene una resistividad de **842Ω•m** y tiene un espesor de **2m**, el material que se encuentra presente son **cantos rodados y gravas de gran tamaño**.

La tercera capa tiene una resistividad de **189Ω•m** asociada a **material aluvial con posibilidades de tener agua**, contiene un espesor de aproximadamente **15m**. La cuarta capa comienza a una profundidad de 18m y existe la presencia de **material aluvial con presencia de humedad**, tiene una resistividad de **63Ω•m**, su espesor aproximado es de **35m**. La quinta capa comienza a una profundidad de **53m** y existe la presencia de material aluvial **arcilloso saturado**, tiene una resistividad de **18Ω•m**, con pocas posibilidades de contener agua.



**Figura 29.**-Litología del corte geoelectrico correspondiente al SEV#3 y su descripción litológica.

En la figura 30 se muestra las gráficas del ajuste de los valores de la resistividad real (resistividad calculada), respecto a la gráfica de los valores de resistividad aparente correspondientes al SEV-4 resultando un error RMS de 8.9%. En la tabla 6 se muestran los valores resultantes de resistividad con base al procesamiento de datos de resistividad, donde se observa el número de capas, resistividad calculada, espesor y profundidad a la que inicia la capa.

El SEV-4 mostrado en la **figura 30** indica un corte geoelectrico tipo **KQQ**, donde:

$$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 = K$$

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 = Q$$

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 = Q$$

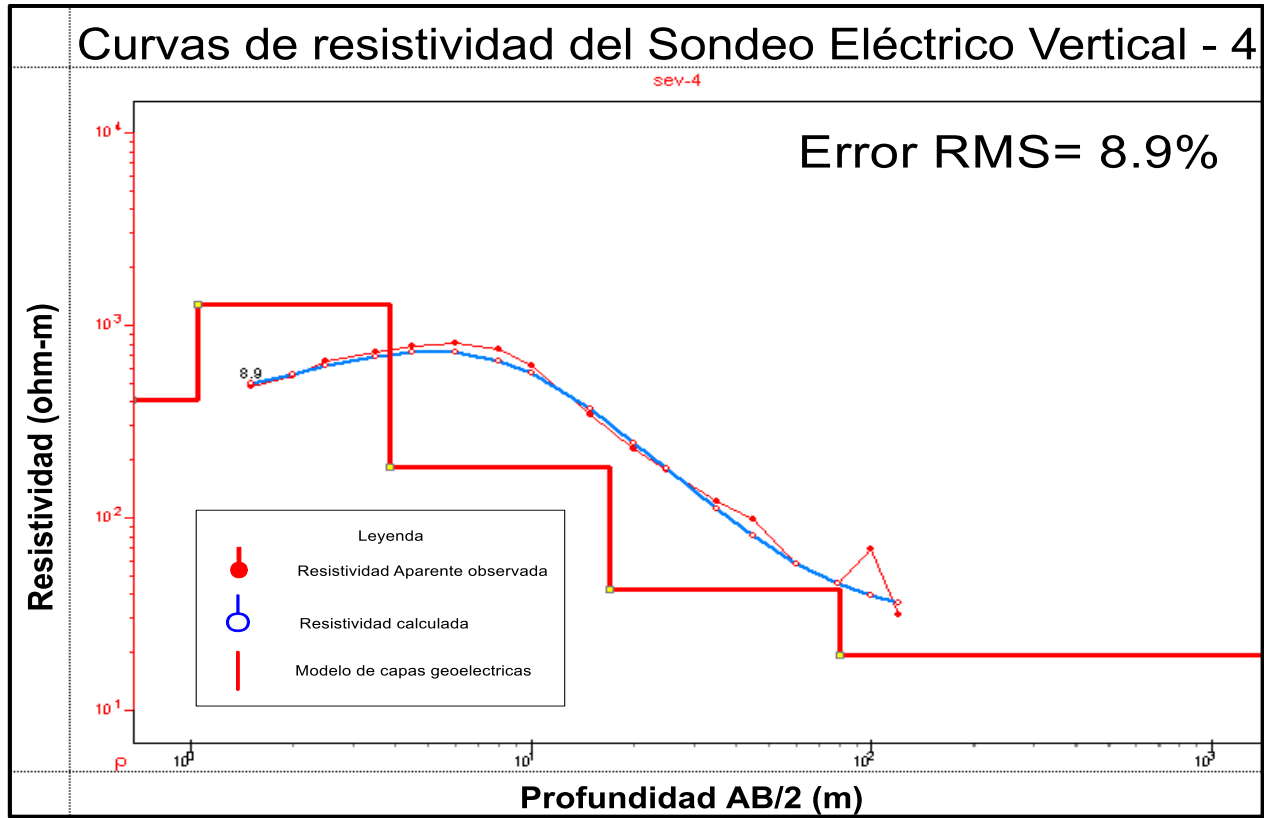


Figura 30.-Ajuste RMS del modelo de capas SEV -4 (Perfil Generado en ZOONDIP1D).

Tabla 6 .-Profundidades resultantes por el modelo con su respectiva resistividad del SEV-4. N= Número de capa,  $\rho$ = resistividad (Ohm-m), h= espesor (m), z=profundidad donde inicia la capa (m).

N	$\rho$	H	Z
1	411	1	0
2	1291	3	1
3	184	13	4
4	42	64	17
5	19		81

### Interpretación del SEV-4:

Se infirieron 5 unidades litológicas con base a la distribución de la resistividad en el subsuelo mostrado en la figura 31. La primera capa tiene una resistividad de **411 $\Omega\cdot m$**  y un espesor de 1m, está asociada a suelo tipo **Phaeozem**. La segunda capa tiene una resistividad de **1291 $\Omega\cdot m$**  y tiene un espesor de 3m, el material que se encuentra presente son **cantos rodados y gravas de gran tamaño**. La tercera capa tiene una resistividad de **184 $\Omega\cdot m$**  asociada a **material aluvial** con posibilidades de tener agua, contiene un espesor de aproximadamente 13m. La cuarta capa comienza a una profundidad de 17m y existe la presencia de **material aluvial con presencia de humedad**, tiene una resistividad de **42 $\Omega\cdot m$** , su espesor aproximado es de 64m. La quinta capa comienza a una profundidad de 81m y existe la presencia de material aluvial fundamentalmente **arcilloso**, tiene una resistividad de **19 $\Omega\cdot m$** , con pocas posibilidades de contener agua. En la figura 31 se describe la litología del SEV-4 con base a los resultados mostrados en la tabla 6.

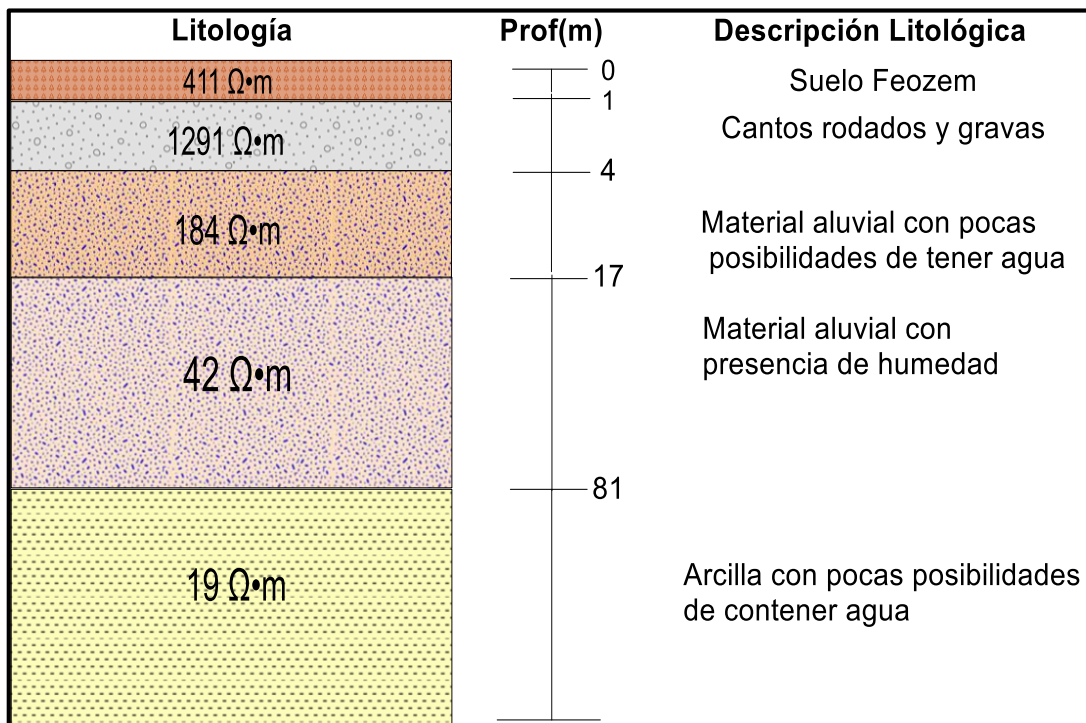
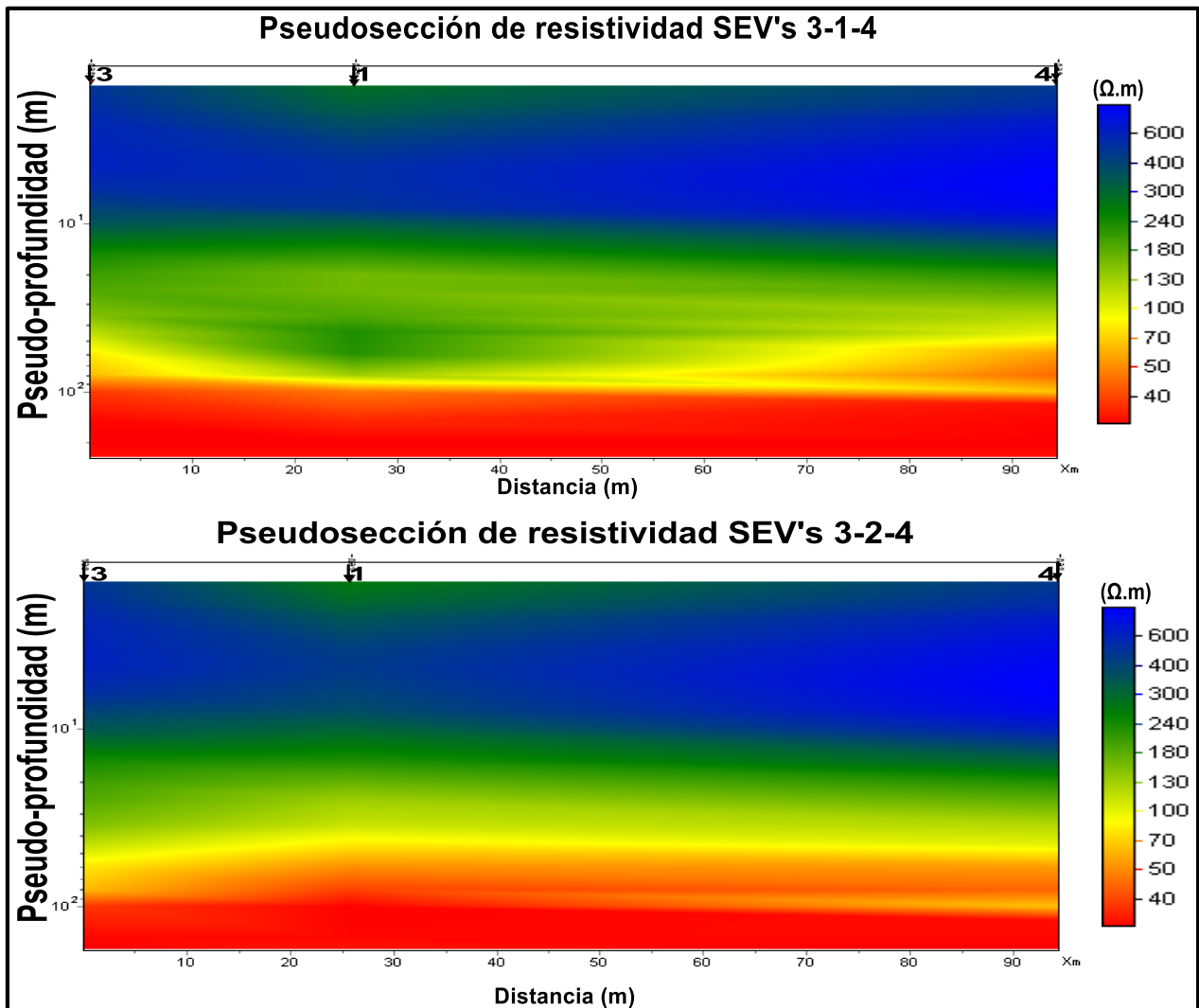


Figura 31.- Litología del corte geoelectrico correspondiente al SEV#3 y su descripción litológica.

## 5.2 Pseudosección de resistividad.

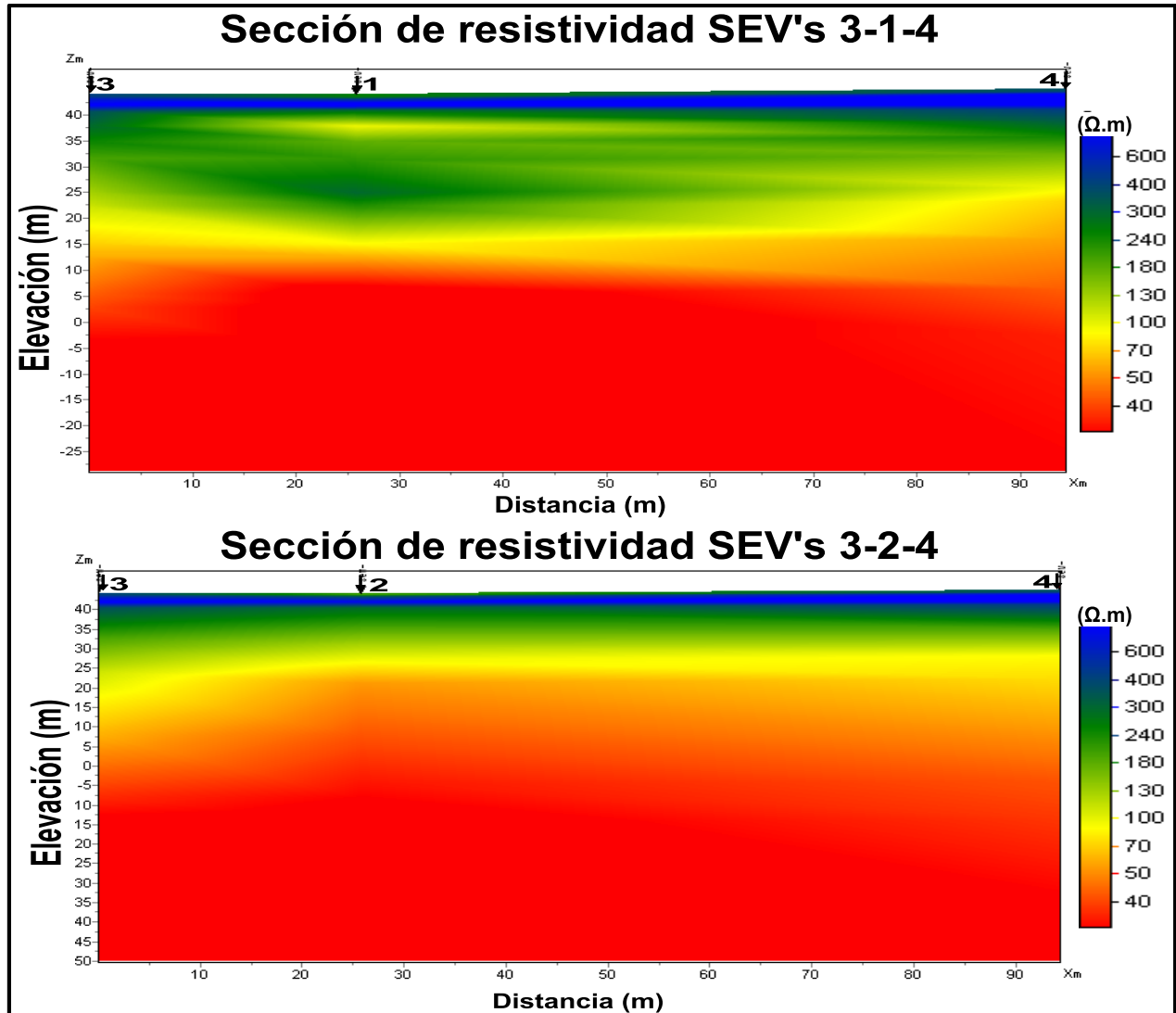
La imagen que se obtiene al conjuntar todos los puntos de atribución es conocida como pseudosección eléctrica como se observa en la figura 32, la cual da como resultado una imagen aproximada de la distribución de la resistividad en el subsuelo y no debe ser vista como una imagen final de la resistividad del subsuelo, sino como una guía inicial para una posterior interpretación cuantitativa (Loke, 2004).



**Figura 32.-**Pseudosecciones de resistividad aparente. De rojo se observan los materiales más conductores y de azul los más resistentes que se asocian a materiales más duros e impermeables.

### 5.3 Sección de resistividad.

Como resultado de los sondeos eléctricos verticales se obtuvieron dos secciones geoelectricas a partir de los perfiles generados por los SEV's 1-3-4 y 2-3-4 , donde en ambos se interpretaron 5 unidades litológicas que representan las características geológicas del lugar (figura 33).

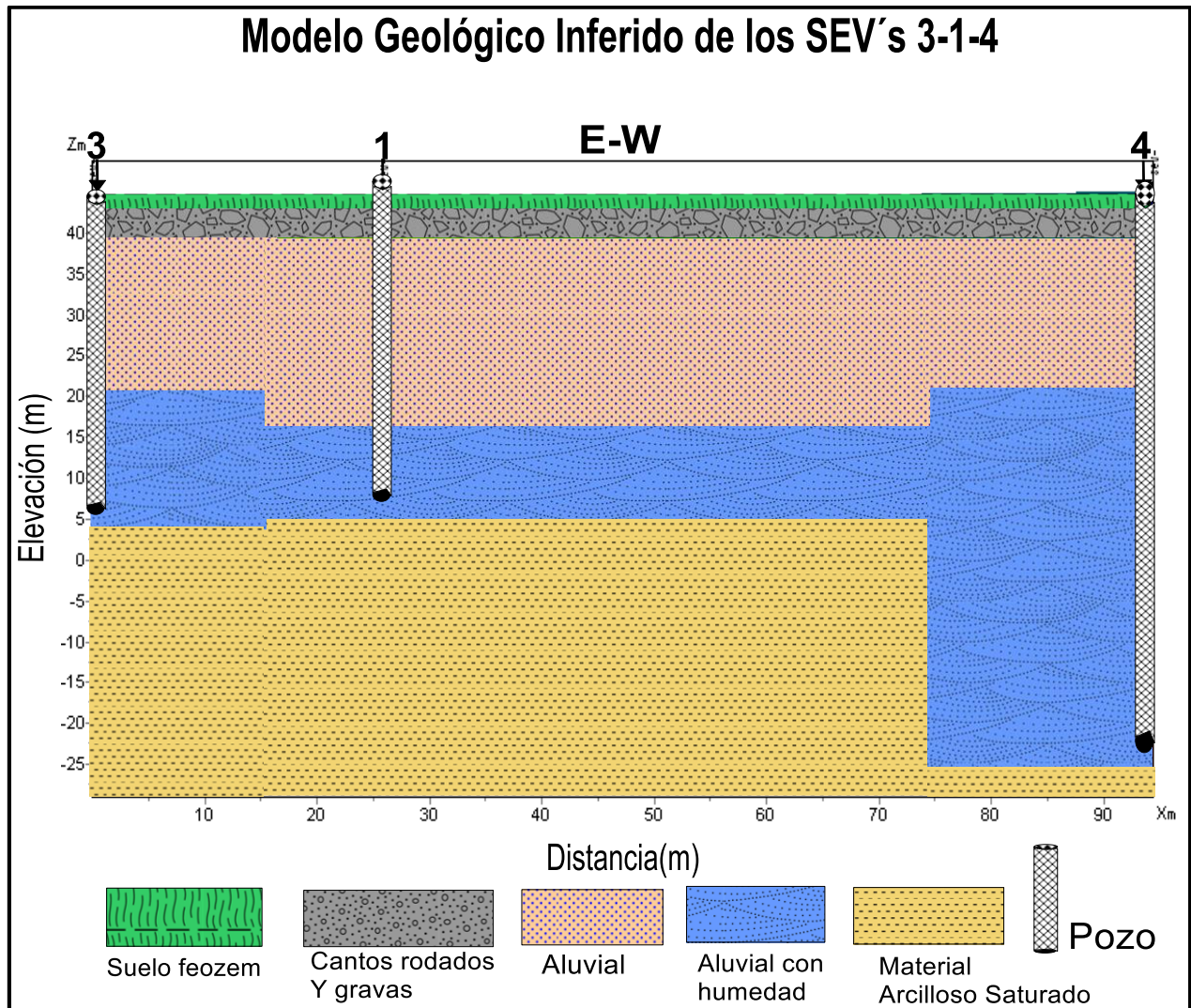


**Figura 33.-**Secciones de resistividad. De rojo se observan los materiales más conductores y de azul los más resistivos que se asocian a materiales más duros e impermeables (Imagen Generada en ZOONDIP1D).

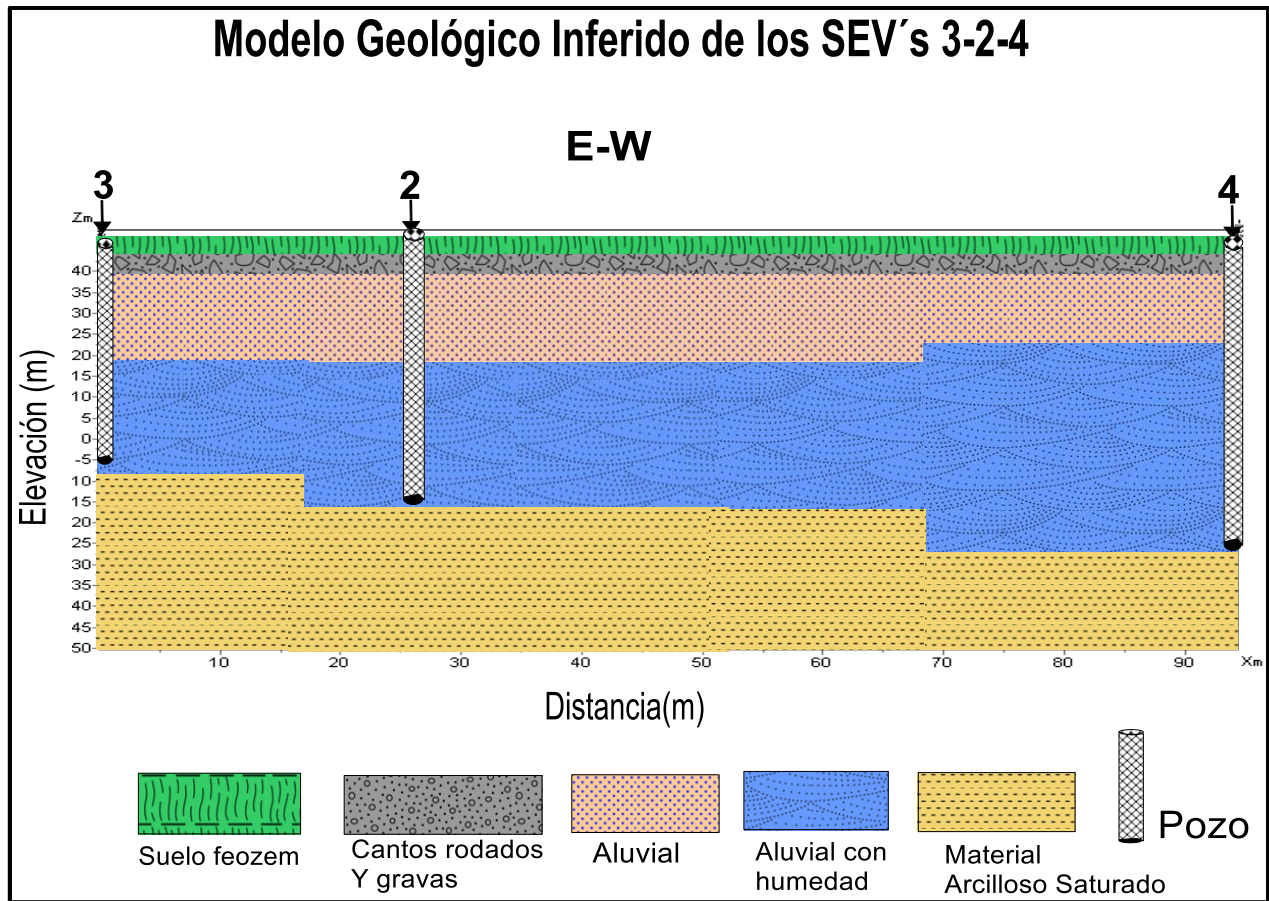
En este trabajo las secciones resultantes de la figura 33 son muy similar a las pseudosecciones de la figura 32, esto indica que la respuesta del modelo generado por el software es confiable y genera más certidumbre.

La sección muestra la distribución de la resistividad real (calculada) que caracteriza el subsuelo, en la figura 33, la sección indica un comportamiento resistivo en la parte superficial que es común cuando existe presencia de boleos y cantos rodados de gran tamaño, posteriormente a esa capa, la resistividad disminuye y es correlacionable con zonas de material aluvial saturadas de agua. A medida que aumenta la profundidad de investigación la conductividad aumenta, sugiriendo la presencia de material arcilloso, estas condiciones suelen ser desfavorables para la transmisión de agua, ya que al ser de poro muy pequeño disminuyen las posibilidades de que los materiales que componen esta capa del subsuelo tengan la capacidad de transmitir agua.

## 5.4 Modelos geológicos.



**Figura 34.-**Sección geológica inferida en base a los resultados de los SEV's 3-1-4 realizados en la localidad de Santa María Huamelula.



**Figura 35.-**Sección geológica inferida en base a los resultados de los SEVS 3-2-4 realizados.

El modelo geológico (figura 35), 3-2-4 del estudio geoelectrico en Santa María Huamelula, es la unidad geológica potencial de interés, está caracterizado por 5 unidades litológicas que representan la composición y distribución de los materiales presentes en el subsuelo, en el cual están representadas las posibilidades de almacenar agua y en caso de existir ser explotada por medio de la perforación de un pozo.

La primera unidad corresponde a suelo tipo feozem, con un espesor de 1 m y suele ser rico en materia orgánica.

La segunda unidad está compuesta por gravas y cantos rodados, a lo largo de todo el perfil mantiene un espesor de 3 m, esta unidad ayuda en la infiltración del agua proveniente de las lluvias meteóricas y de sistemas hidrológicos aledaños.

La tercera capa está compuesta por materiales tipo aluvial con un espesor promedio de 15 metros, desde los 4 metros, donde inicia la capa se pueden dar los primeros índices de aporte superficial de agua provenientes de las cuencas de la zona y de perennes que posiblemente no mantienen su caudal durante todo el tiempo y de las aguas meteóricas de la región.

La cuarta capa corresponde a depósitos sedimentarios correspondientes a materiales aluviales con presencia de humedad, se extiende por todo el perfil con un espesor promedio de 34 metros, esta unidad resulta ser la más favorable debido a la capacidad que tiene estos materiales encontrarse saturados de agua.

La última capa corresponde a materiales arcillosos que se encuentran a una profundidad promedio de 57 metros, determinando el contraste de compactación entre los materiales aluviales debido a su contenido de arcilla, el alto contenido de arcilla disminuye las posibilidades de almacenar agua y de la calidad que presente la misma.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

En el estudio geohidrológico en la localidad de Santa María Huamelula, se concluyó que, de acuerdo con los resultados obtenidos por los estudios de geofísica, que la zona presenta posibilidades acuíferas consideradas como **Intermedias-Altas**, basándose en las características geohidrológicas que existen en el terreno estudiado, donde los materiales presentes son adecuados para almacenar agua, pero deficientes para transmitirla como es la arcilla.

Con la interpretación de la información procesada de los datos obtenidos en campo (SEV's), la geología regional y local, del acuífero Santiago Astata, cartografía de la zona de estudio y tablas de resistividades de diversos autores, se evaluaron 5 unidades litológicas y sus espesores correspondientes a los materiales Feozem, cantos rodados y gravas, materiales aluviales con presencia de humedad y una última unidad conformada por materiales arcillosos saturados.

La unidad litológica de interés corresponde a los materiales aluviales con presencia de humedad que se encuentra encajonada en la parte inferior por materiales arcillosos que determinan el límite de la unidad y subyaciendo con materiales sedimentarios de composición variable ayudando en la circulación, infiltración y captación del agua.

Con base en el resultado de la unidad de interés del modelo geológico SEV's 2-3-4 (figura 35) se propuso la profundidad adecuada para la perforación de un pozo, con base en su potencial de almacenamiento.

**El sitio con posibilidades hídricas corresponde al punto donde se ubica el SEV-4 a una profundidad de perforación de 70m.**

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Extender el número de sondeos eléctricos verticales de manera perpendicular en los sondeos 3 y 4 para conocer la heterogeneidad del subsuelo.
- Extender el número de SEV's en el área de influencia para darle mayor certidumbre a los resultados de los modelos geológicos.
- Con fines de investigación, estudiar la zona de estudio mediante métodos Magnetotelúricos, con el fin de conocer la distribución de la resistividad en dos direcciones.
- En caso de terminar la perforación y antes de ademar en su caso el pozo, se recomienda hacer un registro eléctrico completo de resistividad y potencial natural, para conocer las posibilidades reales de las formaciones geológicas en cuanto a su permeabilidad.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Bhattacharya, Shalivahan. (2016). *Geoelectric Methods: Theory and Applications*. India: MC Graw Hill Education.
- Baltazar, S (2019). *Ubicación de posible manto acuífero, mediante sondeos eléctricos verticales en la comunidad de Maxtaloyan municipio de Xiutetelco, Puebla (Tesis de Pregrado)*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Comisión Nacional Del Agua (CONAGUA,2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Prospección Geoeléctrica y Registros Geofísicos de pozos*. Ciudad de México.
- Del Valle, E (1984). *Apuntes de Introducción a los Métodos Geofísicos de Exploración*. Ciudad de México: Universidad Autónoma de México.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Garcés, F. (2013). *Atlas de Peligro Geológico del Municipio de Santa María Huatulco Oaxaca (Tesis de pregrado)*. México. Universidad Autónoma de México.
- García, A, Ordoñez, M. (2004). *Biodiversidad de Oaxaca*. México: Universidad Nacional Autónoma de México: 2004.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos San Pedro Huamelula*. Oaxaca, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2009). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, versión 3.1*.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED,2002). *Enciclopedia De los Municipios y delegaciones de México*. México, Estado de Oaxaca.
- Keller, G.V. (R.S. Carmichael). (1989). *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*: CRC Press.

- Loke, M. H. (2000). Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. Recuperado de [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com), 128 pág.
- López, E. Geología General y de México (Primera Edición), México: Editorial Trillas
- Menke, W. (1989). Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory (Segunda Edición), San Diego California: Academic Press Inc. 289 pág.
- Nápoles, I. (2005). "Análisis de la deformación en las rocas cenozoicas del Rodeo, Oaxaca México, su implicación tectónica" (Tesis de pregrado). México Universidad Autónoma de México.
- Orellana, E. (1974), Prospección Geo eléctrica en Corriente Continua (Primera Edición). Madrid, España: Paraninfo.
- Orellana, E. (1982). Prospección geoelectrica en corriente continua (2 da edición). Madrid, España: paraninfo.
- Pérez, M. (2015). Curso de métodos eléctricos. Ensenada, baja California, México: Departamento de geofísica aplicada (CICESE).
- Reynolds, J. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Wiley, p. 417-425.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2013), Carta Geológica Minera Santiago Astata D15-A-11. Oaxaca, México. Primera Edición.
- Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA,2014), Lineamientos técnicos para factibilidades, cap: geohidrología.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics. New York, USA: Cambridge University Press.
- Tinajero, J. (1990). Apuntes de aspectos fundamentales en el estudio de agua subterránea (Geohidrología). México: Universidad Autónoma de México. Coordinación de Asuntos Generales.
- Velázquez, L, Ordaz, A (1992). Provincias Hidrogeológicas de México. Ingeniería Hidráulica de México. México.

Vences, O. (2013). Adaptación de datos de sondeos eléctricos verticales para obtener imágenes eléctricas 2D (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de México. Ciudad Universitaria.

Zúñiga, R. (2011). Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje poniente de la ciudad de Guatemala. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria.

# ANEXOS I.- REGISTRO GEOFÍSICO DE POZO

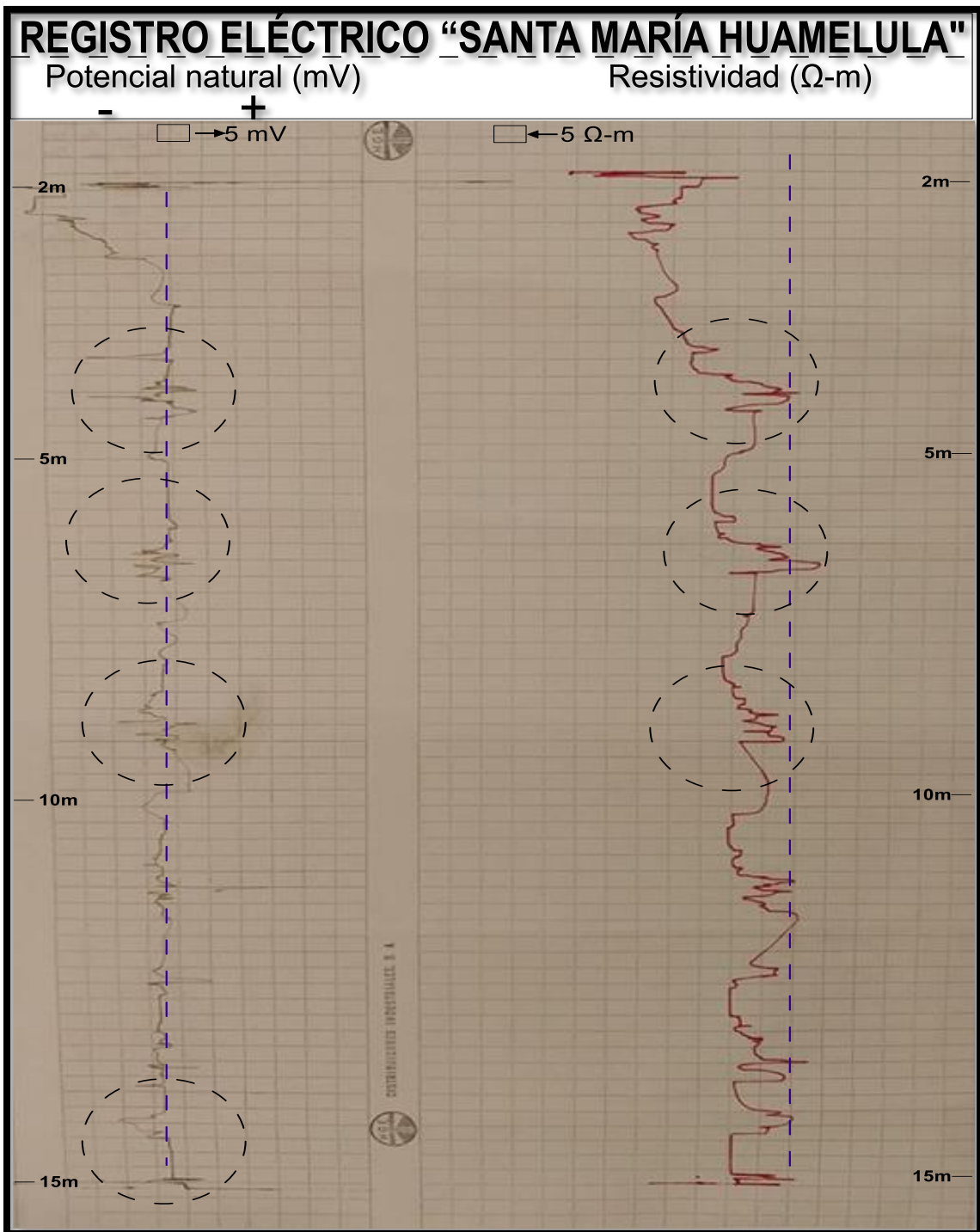


Figura 36.- Registro Geofísico de Pozo

## ANEXO II.- MEMORIA FOTOGRÁFICA

### Memoria fotográfica- Santa María Huamelula SEV'S



## Memoria fotográfica- Santa María Huamelula SEV'S



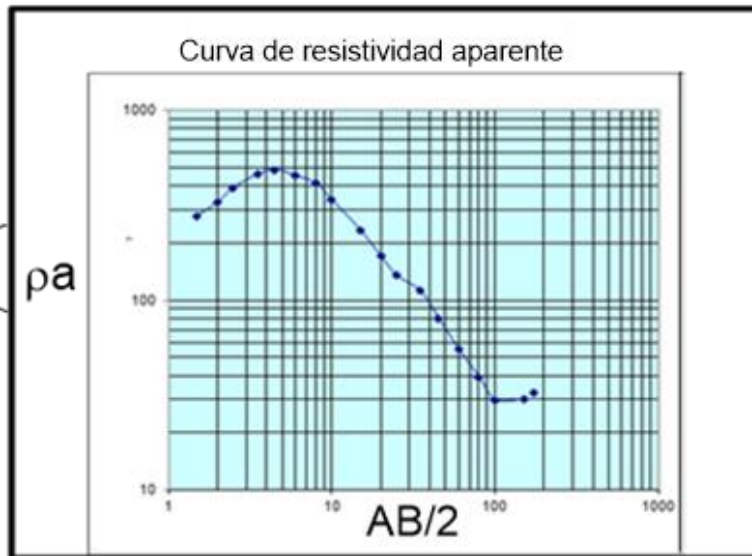
**Figura 37.-**Memoria fotográfica del estudio geoelectrico

# ANEXO III.- TABULACIÓN DE DATOS DE RESISTIVIDAD TOMADOS EN CAMPO

Tabla de valores de Resistividad  
Método schlumberger  
SEV-2

AB/2	MN	K	SP	S IND	Corriente	DIF	Resistividad	AB/2	MN	K	SP	I IND	CORRIENTE	DIF	Resistividad
1.5	0.4	17.7	14.1	-1761	113	1775.1	277.6	60	4	2827.4	66.9	66	51	0.9	49.9
2	0.4	31.4	12.1	-930	91	942.1	325.2	60	10	1131.0	-54.6	-57.3	51	2.7	59.9
2.5	0.4	49.1	10.2	-561	72	571.2	389.4	80	10	2010.6	-55.5	-57.1	82	1.6	39.2
3.5	0.4	96.2	9.1	-443	95	452.1	457.9	100	10	3141.6	-55.9	-56.3	39	0.4	32.2
4.5	0.4	159.0	7.6	-239.9	81	247.5	486.0	100	20	1570.8	-50.3	-51	40	0.7	27.5
6	0.4	282.7	8	-92.6	63	100.6	451.5	150	20	3534.3	-44.7	-45	35	0.3	30.3
8	0.4	502.7	7.6	-44.9	64	52.5	412.3	175	20	4810.6	-41.2	-41.6	59	0.4	32.6
10	0.4	785.4	7.4	-24.4	69	31.8	362.0	200	40	3141.6					
10	1	314.2	43	-25.8	69	68.8	313.2	250	40	4908.8					
15	1	706.9	36.6	16.8	60	19.8	233.3	300	40	7069					
20	1	1256.6	35.2	27.6	56	7.6	170.5								
25	1	1963.5	34.2	30	62	4.2	133.0								
25	2	981.8	11.3	2.7	62	8.6	136.2								
35	2	1924.2	11.1	7.5	62	3.6	111.7								
45	2	3180.9	9.8	8.8	38	1	83.7								
45	4	1590.4	64.9	63.1	37	1.8	77.4								

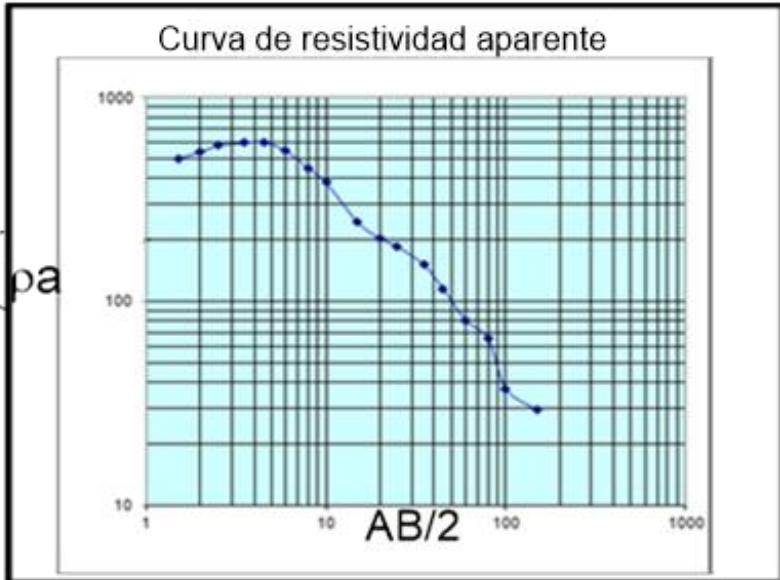
AB/2	$\Omega \cdot m$
1.5	277.6
2	325.2
2.5	389.4
3.5	457.9
4.5	486.0
6	451.5
8	412.3
10	337.6
15	233.3
20	170.5
25	134.6
35	111.7
45	80.5
60	54.9
80	39.2
100	29.9
150	30.3
175	32.6



## Tabla de valores de Resistividad Método schlumberger SEV-3

AB/2	MN	K	SP	S IND	CORRIENTE	DIF	Resistividad	AB/2	MN	K	SP	I IND	CORRIENTE	DIF	Resistividad
1.5	0.4	17.7	23.3	-1917	68	1940.3	504.2	60	4	2827.4	46.7	44.2	86	2.5	82.2
2	0.4	31.4	21.9	-1344	79	1365.9	543.2	60	10	1131.0	-18.8	-24.7	84	5.9	79.4
2.5	0.4	49.1	20.6	-727	63	747.6	582.5	80	10	2010.6	-18.1	-19.8	52	1.7	65.7
3.5	0.4	96.2	18.5	-300.3	51	318.8	601.4	100	10	3141.6	-17.3	-18.8	121	1.5	38.9
4.5	0.4	159.0	17.1	-230.3	65	247.4	605.3	100	20	1570.8	43.5	40.7	123	2.8	35.8
6	0.4	282.7	16	-86.7	53	102.7	547.9	150	20	3534.3	45.3	44.7	72	0.6	29.5
8	0.4	502.7	11.9	-31.8	49	43.7	448.3	200	20	6283.2					
10	0.4	785.4	11.1	-18.1	55	29.2	417.0	200	40	3141.6					
10	1	314.2	22.3	-38.6	55	60.9	347.9	250	40	4908.8					
15	1	706.9	24.1	-3.9	81	28	244.3	300	40	7069					
20	1	1256.6	24.4	11.4	80	13	204.2								
25	1	1963.5	24.5	17	80	7.5	184.1								
25	2	981.8	-17.5	-32.7	80	15.2	186.5								
35	2	1924.2	-16.8	-22	66	5.2	151.6								
45	2	3180.9	-16.5	-20	92	3.5	121.0								
45	4	1590.4	44.6	38.3	92	6.3	108.9								

AB/2	$\Omega \cdot m$
1.5	504.2
2	543.2
2.5	582.5
3.5	601.4
4.5	605.3
6	547.9
8	448.3
10	382.4
15	244.3
20	204.2
25	185.3
35	151.6
45	115.0
60	80.8
80	65.7
100	37.4
150	29.5



## Tabla de valores de Resistividad Método schlumberger SEV-4

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
5	AB/2	MN	K	SP	S IND	CORRIENTE	DIF	Resistividad	AB/2	MN	K	SP	I IND	CORRIENTE	DIF	Resistividad
6	1.5	0.4	17.7	-17	-1770	64	1753	484.0	60	4	2827.4	-51	-52.2	65	1.2	52.2
7	2	0.4	31.4	-13.8	-1008	57	994.2	548.0	60	10	1131.0	67.8	64.2	64	3.6	63.6
8	2.5	0.4	49.1	-9	-814	61	805	647.8	80	10	2010.6	67.6	66.1	66	1.5	45.7
9	3.5	0.4	96.2	-10.2	-397.2	51	387	730.1	100	10	3141.6	67.2	65.3	55	1.9	108.5
10	4.5	0.4	159.0	-10	-249.2	49	239.2	776.4	100	20	1570.8	-96.3	-97.3	55	1	28.6
11	6	0.4	282.7	-9.4	-154.7	51	145.3	805.5	120	20	2262.0	-90.9	-92.4	109	1.5	31.1
12	8	0.4	502.7	-4.5	-93	59	88.5	754.0	200	20	6283.2					
13	10	0.4	785.4	-4.6	-64.2	67	59.6	698.7	200	40	3141.6					
14	10	1	314.2	10	-105.8	67	115.8	543.0	250	40	4908.8					
15	15	1	706.9	13	-16.7	61	29.7	344.2	300	40	7069					
16	20	1	1256.6	14.6	4.2	57	10.4	229.3								
17	25	1	1963.5	15.7	8.4	79	7.3	181.4								
18	25	2	981.8	-5.5	-19.7	80	14.2	174.3								
19	35	2	1924.2	-7.6	-12.3	74	4.7	122.2								
20	45	2	3180.9	-7.6	-9.2	54	1.6	94.2								
21	45	4	1590.4	-52.5	-56	54	3.5	103.1								

AB/2	$\Omega \cdot m$
1.5	484.0
2	548.0
2.5	647.8
3.5	730.1
4.5	776.4
6	805.5
8	754.0
10	620.8
15	344.2
20	229.3
25	177.8
35	122.2
45	98.7
60	57.9
80	45.7
100	68.5
120	31.1

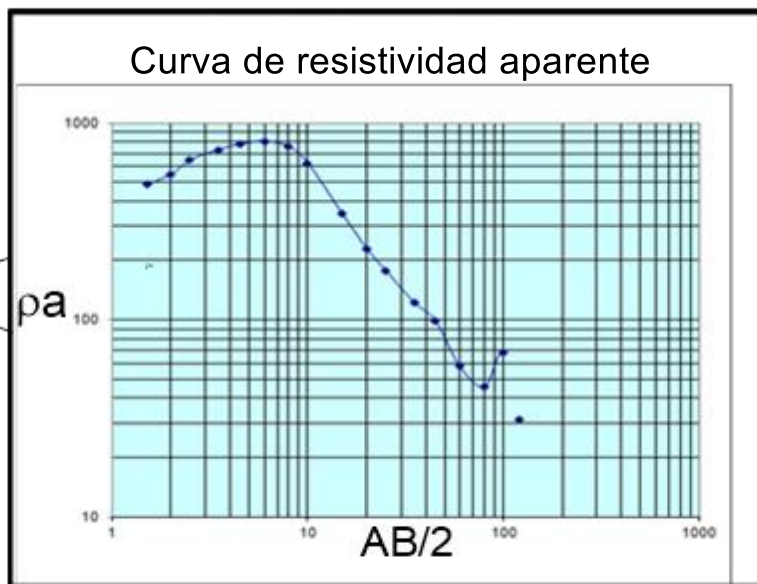


Figura 38.-Captura de datos de resistividad aparente.