



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA
CIENCIAS DE LA TIERRA**

**“EXPLORACIÓN HIDROLÓGICA MEDIANTE LA APLICACIÓN
DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES Y SÍSMICA DE
REFRACCIÓN EN CUBA LIBRE, GUERRERO”**

OPCIÓN CURRICULAR:

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

SAMUEL SANTOS REYES BENITEZ

ASESORES:

M. en C. LEOBARDO SALAZAR PEÑA

Dr. OMAR DELGADO RODRÍGUEZ



MÉXICO D.F.

DICIEMBRE 2009

"Nadie sabe de lo que es capaz de hacer,
hasta que trata de hacerlo."

MARDEN

"Para tener éxito hay que tener amigos,
para tener mucho éxito hay que tener enemigos."

F. SINATRA

"La verdadera medida de nuestra valía se
compone de todos los beneficios que los
demás han obtenido de nuestro éxito."

CULLEN HIGHTOWER

DEDICATORIA

A mis padres, Leticia y Samuel, por el incansable apoyo que siempre me han brindado; por ser la guía y la institución que ha hecho de mí quien soy; por siempre ponerme los pies en la tierra y sus eternas palabras de aliento. Por la confianza que siempre me han depositado.

A mi hermana, Adriana, por ser tan paciente conmigo y siempre apoyarme.

A mis tíos, Lucrecia y Juan, y a mis primos, Jesús, Dione y Yael; por creer en mí y hacerme sentir importante en su familia, por las magnificas charlas y su comprensión.

A mis tíos Anselmo y María, a mis primos Jesús y Margarita, Por creer en mí, escucharme y apoyarme incondicionalmente.

A mis amigos Cinthia, Claudia, Marisol, Narcedalia, Jessica, Rocío, Edgar, Fernando, Giovanni, Gabriel y Uriel; por brindarme su amistad todos estos años y por compartir conmigo tantas experiencias.

A Gabriela Santos, por estar a mi lado a cada momento, apoyarme, escucharme y ayudarme a vencer mis temores; por nunca dejarme desistir; por ser siempre mi guía.

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a mis asesores: M. en C. Leobardo Salazar Peña y Dr. Omar Delgado Rodríguez, por todo su tiempo, apoyo, consejos, dedicación, interés; porque sin ellos no hubiese podido culminar con este proyecto.

Al Ing. Felipe Becerra, por facilitarnos el equipo para la realización de la prospección eléctrica.

A Gabriela Santos M. y a Rocío Mendoza, por todos sus comentarios, revisiones y el apoyo que me brindaron a cada momento.

Al Dr. Rodolfo Corona, por ayudarme con la Síntesis Geológica.

A los pobladores de Cuba Libre por su hospitalidad y ayuda brindada durante la realización de los estudios.



III.2.4.2 Caso de la Onda Refractada	37
III.2.4.3 Caso de tres capas	38
III.2.4.4 Caso general de n capas	38
III.2.4.5 Caso de un refractor inclinado y plano	38
III.3 Modelado Petrofísico	40
III.3.1 Procedimiento de campo	40
III.3.1.1 Toma de muestras de agua	40
III.3.1.2 Toma de muestras de suelo	40
III.3.2 Procesamiento de muestras en laboratorio	41
III.3.2.1 Muestras de agua	41
III.3.2.2 Muestras de Suelo	43
Capítulo IV. Metodología	50
IV.1 Interpretación de imágenes aéreas	51
IV.2 Modelado Petrofísico	52
IV.2.1 Procedimiento de campo	52
IV.2.1.1 Toma de muestras de agua y de suelo	52
IV.3 Trabajo en laboratorio	54
IV.3.1 Análisis de muestras de agua	54
IV.3.2 Análisis de muestras de suelo	54
IV.4 Estudios de campo	55
IV.4.1 Prospección Sísmica	57
IV.4.1.1 Instrumentación	57
IV.4.1.2 Adquisición de datos sísmicos	57
IV.4.2 Prospección Eléctrica	58
IV.4.2.1 Instrumentación	58
IV.4.2.2 Adquisición de SEV	59
IV.5 Trabajo de gabinete	61
IV.5.1 Interpretación Sísmica	61
IV.5.2 Interpretación de SEV	65
IV.6 Análisis de resultados	67
IV.6.1 Modelado Petrofísico	67
IV.6.1.1 Resultados de MRA	67
IV.6.1.2 Resultados de MRS	67
IV.6.2 Sondeos Eléctricos Verticales	68
IV.6.3 Análisis SEV-Modelado petrofísico	69
IV.6.4 Sísmica de Refracción	72
IV.6.5 Análisis: Sísmica-SEV	72
V. Conclusiones y Recomendaciones	75
V.1 Conclusiones	75
V.2 Recomendaciones	75
Referencias y Bibliografía	77



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Núm.	Notas	Página
2.1	Vegetación característica. A) Estrato arbóreo; B) Leguminosas; C) Estrato herbáceo	10
2.2	Columna estratigráfica compuesta, de la Cuenca del Río Tlapaneco Alto. Modificada de EGEOMESA (1984).	22a
3.1	Cambios en los contrastes de resistividad entre arena y arcilla de acuerdo a la salinidad del agua.	42
4.1	Puntos de muestreo. Tipo de muestra y coordenadas UTM.	53
4.2	Datos obtenidos con el resistímetro SARIS, en el sondeo 1, con coordenadas UTM 553590, 1933397.	60
4.3	Datos obtenidos con el resistímetro SARIS, en el sondeo 2, con coordenadas UTM 553607, 1933306.	60
4.4	Valores medidos de resistividad y calculados de salinidad para cada muestra de agua.	67
4.5	Propiedades petrofísicas obtenidas con el software Petrofiz, para cada muestra de suelo.	67
4.6	Resultados del SEV1, interpretado con IX1D	69
4.7	Resultados del SEV2, interpretado con IX1D	69
4.8	Parámetros petrofísicos calculados a partir de la resistividad del estrato y la salinidad del agua subterránea	69
4.9	Correlación de resultados entre sísmica de refracción y SEV	72



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Núm.	Nota al pie.	Página
1.1	Fosa de almacenamiento de agua improvisada por pobladores.	2
2.1	Mapa de localización.	5
2.2	Vías de comunicación.	6
2.3	Configuración de Temperaturas del Estado de Guerrero. Fuente INEGI.	8
2.4	Mapa de precipitación total anual del Estado de Guerrero. Fuente INEGI.	9
2.5	Mapa de climas del Estado de Guerrero. Fuente INEGI.	10
2.6	Regiones hidrológicas del estado de Guerrero. Modificado de INEGI.	12
2.7	Carta de Escurrimiento Superficial. Modificado de INEGI.	13
2.8	S.I.A.S. Síntesis hidrométrica anual, para el periodo 1964-1994. Estación hidrométrica Teponahuazo.	14
2.9	Provincias Fisiográficas de México. Fuente INEGI.	15
2.10	Fisiografía del Estado de Guerrero. Fuente: Monografía Geológica-Minera, Estado de Guerrero (MGMEG, 1999).	16
3.1	Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982)	26
3.2	Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo.	27
3.3	Dispositivo Wener.	28
3.4	Dispositivo Schlumberger.	28
3.5	Principio del SEV. A medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas.	30
3.6	Curvas de resistividad verdadera para diversos cortes geoeléctricos (Orellana, 1982)	31
3.7	Rayo refractado incide oblicuamente sobre una interface con contraste de impedancia acústica.	35
3.8	Trayectorias de los rayos directos, reflejados y refractados en una superficie cercana hacia un detector, para el caso de un modelo geológico simple de dos capas.	36
3.9	Trayectorias de los rayos directos, reflejados y refractados en una superficie cercana hacia un detector, para el caso de un modelo geológico de tres capas.	37
3.10	Refracción con refractor inclinado.	39
3.11	Relación entre la resistividad del agua y su salinidad para una temperatura de 20 °C	41
3.12	Gráfica para la relación entre la resistividad de diferentes tipos de suelo y la salinidad del agua de poro. R1, R2 y R3: rangos de resistividad para diferentes tipos de suelo cuando la salinidad	43



	del agua de poro es igual a 0.05, 0.5 y 5 g/l, respectivamente.	
3.13	Diagrama de la metodología para la determinación de los parámetros petrofísicos del suelo.	44
3.14		46
3.15	Resistivímetro	48
4.1	Imagen aérea clave E14D32B. Fuente INEGI. Muestra la zona de estudio. En color azul, se marcan los drenajes. El recuadro rojo, encierra el área probable de estudio, el rectángulo amarillo encierra la zona donde se planea hacer los estudios para el presente proyecto.	51
4.2	Puntos de muestreo. Mapa generado con el software Global Mapper, con proyección Nad27.	53
4.3	Resistivímetro	54
4.4	Preparación de muestras de suelo, para su análisis	55
4.5	a) Se muestra el tendido sísmico y los SEV en un modelo 3D generado con Global Mapper, con proyección Nad27 (México). b) Se muestra el tendido sísmico (azul) y los SEV (1 y 2) en imágenes satelitales, fuente Google Earth.	56
4.6	Configuración del tendido sísmico; se muestra la posición de los geófonos, las fuentes y los archivos en los cuales se guardo la información de cada fuente.	58
4.7	Se observa la realización del sondeo 2.	59
4.8	Se presenta el sismograma del archivo FILE4629. Las trazas representan la energía registrada por cada geófono. Las trazas ruidosas, como la 2 y la 6, son eliminadas.	61
4.9	Se presenta el sismograma del archivo FILE4630. El tiempo de grabación fue de 500ms, sin embargo los datos requeridos, se encuentran en los primeros 200ms, como se observa en las figuras.	62
4.10	Se presenta el sismograma del archivo FILE4631. Las líneas rojas horizontales, delimitan el tiempo de los primeros arribos, esto se lee y marca traza por traza.	62
4.11	Se presenta el sismograma del archivo FILE4632.	63
4.12	Pantalla de datos para crear archivo de interpretación en Seis-Refa.	63
4.13	Carga de datos en Seis-refa previo a interpretación.	64
4.14	Se muestra la lectura de una reflexión en la traza 14 del sismograma 4629. La profundidad de la capa se calcula mediante de un promedio de velocidades y el tiempo de arribo.	65
4.15	Datos de campo del SEV1 cargados en el software IX1D.	66
4.16	Datos de campo del SEV2 cargados en el software IX1D.	66
4.17	Modelo 1D generado con el software IX1D para el SEV1.	68
4.18	Modelo 1D generado con el software IX1D para el SEV2.	68
4.19	Figura 4.19. Determinación de litología para los estratos 2/1, 3/1, 2/2, 3/2 y 4/2. La línea roja, indica la salinidad del agua	70



4.20	Se presenta el modelo 2D, generado en Surfer	71
4.21	Correlación entre los resultados obtenidos con ambos métodos de exploración	72
4.22	Estratigrafía propuesta.	73
5.1	Propuesta para la construcción de una red de distribución de agua.	76



RESUMEN

El agua es un elemento vital que en muchas zonas del mundo es escaso. Para la comunidad de Cuba Libre, en el Estado de Guerrero, es un recurso, por el que se pagan fuertes sumas de dinero, por lo que el Instituto Politécnico Nacional, brinda como un servicio social, la exploración de agua subterránea dando como resultado el presente proyecto.

La exploración de agua se realiza por medio de estudios geofísicos, como son Sondeos Eléctricos Verticales, un Modelado Petrofísico y Sísmica de refracción. Estos métodos fueron aplicados con el apoyo de algunos pobladores en sitios de mayor interés.

Para el procesamiento de datos se usaron distintos programas entre los cuales destacan IX1D, IXSEG2, Seis-Refa, Surfer, entre otros.

Se localizaron acuíferos someros, con agua de salinidad no recomendable para consumo humano, sin embargo, si es adecuada para satisfacer las necesidades en el hogar.

Se propone la construcción de obras hidráulicas para la explotación, almacenamiento y distribución del agua.



ABSTRACT

Water is a vital element that in many places of the world it is scanty. To Cuba Libre's community, located in the State of Guerrero, it is a resource for which people have to pay elevated rates. That's why the Instituto Politecnico Nacional provides as a social service the exploration of groundwater, giving as a result the present project.

Exploration of groundwater is made using geophysical studies like Vertical Electrical Sounding, Petrophysic Models and Seismic Refraction. These methods were applicated with the support of some residents in the most interesting places.

For the data processing were used different programs like IX1D, IXSEG2, Seis-Refa, Surfer, and other more.

Were located shallow aquifers, with salinity not recommendable for human consumption, however, it is adequate to satisfy home's needs.

It is propose the construction of hydraulic works to achieve the exploitation, storage and distribution of water.



I. INTRODUCCIÓN

El agua es un componente vital del ambiente, como también un valioso recurso natural para el hombre, forma parte de los ciclos de la naturaleza que sustentan tanto la vida como las características de los ecosistemas (incluyendo los originados por actividades humanas), y es también medio o insumo de distintas actividades económicas.

El presente proyecto se enfoca en la búsqueda de agua subterránea para satisfacer las necesidades de un poblado ubicado en La Montaña de Guerrero.

Para cumplir con los objetivos, se compiló información acerca de las características del medio ambiente, que influyen directamente en la presencia o ausencia del agua, tales como geología, clima, vegetación e hidrografía.

I.1. Descripción del problema

La Región de la Montaña, en el estado de Guerrero, se caracteriza socioeconómica y culturalmente, por tener una amplia distribución de pequeños asentamientos humanos, con raíces indígenas, en las cuales, el grueso de la población vive en situación de pobreza, y donde, además, no existe el servicio de agua potable.

En este marco, se encuentra el poblado de Cuba Libre, Municipio de Xalpatláhuac, localizado al este de la cabecera municipal, lugar en el cual se desarrolla el presente trabajo.

La siembra de temporal, la crianza de aves de corral y en menor medida la ganadería bobina, son los principales sustentos para la población, sin embargo, la carencia del servicio de agua potable, reduce significativamente las posibilidades de progreso.

Los pobladores deben satisfacer sus requerimientos del vital líquido, captando el agua de las lluvias, que solo aparecen en verano, en pequeñas fosas a través de escurrimientos o "lloraderos" (Fig. 1.1). Sin embargo, el volumen de agua captado es insuficiente para cubrir las necesidades más esenciales, tales como aseo personal, lavar utensilios de cocina, ropa, etc.



Fig. 1.1 Fosa de almacenamiento de agua improvisada por pobladores.

Al llegar el periodo de estiaje, los volúmenes de agua en las fosas antes mencionadas, disminuye dramáticamente, situación que orilla a la gente a adquirir pipas de agua, las cuales son vendidas a precios excesivos, cobijados en el hecho de que la comunidad se encuentra en la sierra y el acceso es difícil a través de caminos de terracería.

I.2. Objetivos

La comunidad de Cuba Libre, a través de un representante, acudió al Instituto Politécnico Nacional, solicitando ayuda para resolver sus problemas de agua. Por medio del M. en C. Leobardo Salazar P. fue atendida esta solicitud, poniendo en marcha el presente proyecto.

Inicialmente se plantearon como objetivos:

- Aplicar métodos geofísicos, en las zonas más adecuadas, para la localización de acuíferos.
- Por medio de la Sísmica de Refracción, localizar la capa de migración que domina los movimientos y almacenamientos de agua.
- Identificar las zonas con resistividades adecuadas, en las cuales se pueda inferir la existencia de agua apropiada para el consumo humano.



- Realizar un modelado petrofísico, el cual nos permitirá conocer las condiciones geológicas e hidrológicas del medio.
- Proyectar la perforación de pozos que cubran los requerimientos de agua en el poblado.

Desafortunadamente, conflictos de carácter político entre los pobladores, impidieron la realización de los estudios como se proyectaron en primera instancia. Además, la falta de apoyo gubernamental y el difícil acceso para la maquinaria, impediría la construcción de pozos profundos que realmente acabarían con la carencia de agua. Por estos motivos, los objetivos tuvieron que cambiar:

- Aplicar métodos geofísicos, en las zonas permitidas del poblado, para la localización de acuíferos.
- Por medio de la Sísmica de Refracción, localizar la capa de migración que domina los movimientos y almacenamientos de agua.
- Identificar las zonas con resistividades adecuadas, en las cuales se pueda inferir la existencia de agua apropiada para el consumo humano.
- Realizar el modelado petrofísico, de la formación predominante en el subsuelo
- Proyectar la construcción de obras hidráulicas para satisfacer el suministro de agua.

I.3. Justificación del método utilizado

Los Métodos Eléctricos, como rama de la exploración geofísica, y específicamente los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) ofrecen una herramienta poderosa, la cual, utilizada de forma adecuada, nos da los elementos para inferir zonas del subsuelo saturadas con agua.

La Sísmica de Refracción, es una herramienta capaz de proveernos la información necesaria para desarrollar un modelo de las estructuras existentes en el subsuelo en las profundidades que se realizará la búsqueda de agua. Es importante resaltar que la Sísmica de Refracción no nos aporta información para la detección de zonas saturadas con agua; lo que nos indica, son las estructuras existentes, tales como fallas, cambios litoestratigráficos, etc.



INTRODUCCIÓN



Tomando en cuenta lo anterior, se pretende elaborar una relación entre los datos obtenidos con los SEV y la Sísmica de Refracción y una vez conocidas con más detalle las estructuras del subsuelo, se espera tener una idea más completa sobre el funcionamiento hidráulico y la magnitud de los recursos hídricos en el subsuelo; con ayuda de un modelado petrofísico, podemos determinar si dicha agua tiene las características de salinidad adecuadas para su explotación y consumo humano y de esta manera, plantear con bases reales, la perforación de pozos, así como tanques de almacenamiento.



II. GENERALIDADES

II.1. Localización y vías de Comunicación.

El poblado de Cuba Libre, se localiza en el Municipio de Xalpatláhuac, al este de la cabecera municipal, en el Estado de Guerrero, en la Región conocida como La Montaña, al NE del Estado (Fig. 2.1).

Geográficamente, la comisaría de Cuba Libre se ubica en las coordenadas 17° 28' 49" de latitud Norte y 98° 29' 51" de longitud Oeste, a 1570 m.s.n.m.

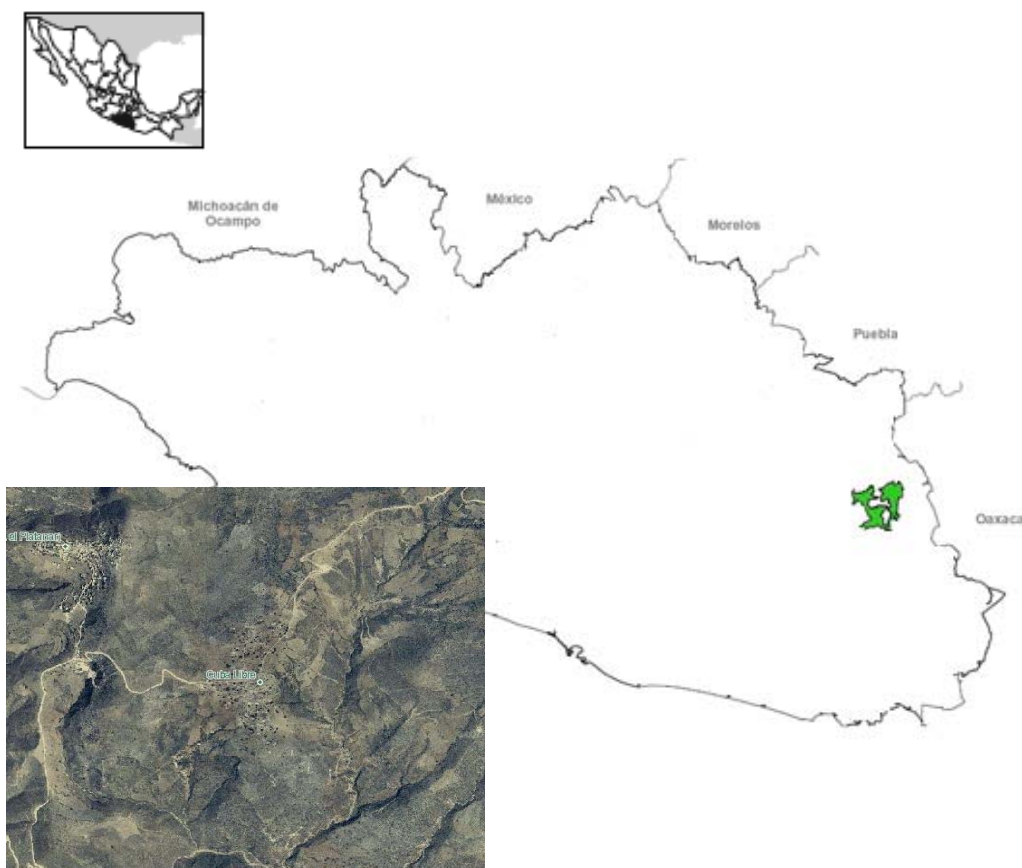


Fig. 2.1 Mapa de localización



Por lo que respecta a vías de comunicación, sólo existen dos formas de llegar a Cuba Libre, y ambas son caminos de terracería.

- La primera es llegando desde Tlapa, pasando por Igualita, hasta tomar una desviación que ciertamente no cuenta con letreros ni indicaciones. Desde Tlapa hasta Cuba Libre, el tiempo total de recorrido es de aproximadamente 2 horas 30 min.
- La segunda es desde Tlaxiáhuac, pasando por Alcozauca de Guerrero.



ción

II.2. Población y cultura

De acuerdo con el II Censo de Población y Vivienda que realizó el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en el año 2005, el municipio de Xalpatláhuac contaba hasta ese entonces con un total de 12 615 habitantes, de dicha cantidad, 5 962 eran hombres y 6 653 eran mujeres.



Sin embargo, la comunidad que a este proyecto concierne únicamente contaba con 796 habitantes, lo cual representa el 6.3% del total municipal, de los cuales 382 eran hombres y 414 eran mujeres.

La mayor parte de los pobladores hablan español, sin embargo el dialecto predominante es el Mixteco ya que el 100% de las personas lo hablan, además, en el lugar un gran número de personas hablan el idioma inglés, esto derivado de la migración a U.S.A.

Respecto a educación, el único centro educativo es la Escuela Primaria Fed. Bil. "Juan N. Álvarez", y para continuar con los estudios las opciones más cercanas son las escuelas ubicadas en Tlapa o Xalpatláhuac.

Por lo que se refiere a servicios médicos, no se cuenta con un médico en la comunidad, sin embargo, existen brigadas de salud, que visitan la comunidad, según información de los mismos pobladores. En caso de alguna emergencia, la única opción, es trasladarse hasta Tlapa.

La economía se basa en la agricultura, principalmente maíz y siendo esta estrictamente de temporal. Aunque también se da la crianza de animales de corral. Además del maíz, se siembra frijol, calabaza, huaje, chiles, entre otros.

En las tierras de temporal es difícil que se obtenga una producción más allá del autoconsumo, pues la escasa precipitación, la falta de infraestructura en comunicaciones y transporte, el descanso de 3 a 5 años que se le da a los terrenos agrícolas, los primitivos medios de producción y la falta de créditos dificultan la actividad agrícola (Milán, 1997).

II.3. Climatología

Debido a que el objetivo de este proyecto se relaciona directamente con los recursos hidráulicos, se consideró importante adquirir información acerca de los factores que intervienen en la presencia o ausencia de este preciado líquido.

II.3.1. Temperatura

De acuerdo con la configuración de temperaturas medias anuales realizada por INEGI (Fig. 2.3), la temperatura media anual oscila entre los 22° y los 26° C.



II.3.2. Precipitación

Las isoyetas son conocidas como las líneas que delimitan zonas de igual registro de precipitación, se presentan para Guerrero desde menores a 600 mm, hasta mayores a 2 500 mm. De esta forma podemos apreciar que las zonas que reciben mayor precipitación son precisamente las partes más



altas o bien, cercanas a la costa y las de menores registros hacia la parte noroeste y noreste del estado.

Cuba libre se encuentra en una zona donde la precipitación promedio anual es de aproximadamente 1000mm (Fig. 2.4). En esta zona, la temporada de lluvias, se haya comprendida entre los meses de junio a noviembre de cada año, anunciándose dicha temporada algunos años en abril y otros en mayo y registrando las mayores precipitaciones en junio y septiembre.



II.3.3. Clima

De acuerdo con lo mencionado en los párrafos anteriores, se concluye que el tipo de clima predominante es cálido subhúmedo, con lluvias en verano, tal como se muestra en la carta de climas publicada por INEGI (Fig. 2.5). Donde el cociente precipitación/temperatura (P/T) oscila entre 38.4 y 45.4, donde además, la lluvia invernal es menor del 5% anual y donde el mes más caliente es mayo.





II.4. Vegetación

Dentro del área de estudio, la vegetación es del tipo Selva baja caducifolia, esto relacionado en forma directa con el tipo de suelo y la altitud, y en consecuencia también en función de la temperatura y las precipitaciones pluviales.

La Selva baja caducifolia se caracteriza porque todos o la mayor parte de sus árboles, tiran sus hojas en temporada seca, la cual es de diciembre a mayo. Las especies comunes son:

A)	Nombre común	Nombre científico
	Chijol o Jabin	<i>Piscidia piscipula</i>
	Tsalam	<i>Lysiloma bahamensis</i>
	Copite o Siricote	<i>Cordia dodecandra</i>
	Camarón o Plumajillo	<i>Albaradoa amorphoides</i>
	Brasil	<i>Haematoxylon brasiletto</i>
	Tepeguaje	<i>Lysiloma gellermanní</i>
	Copal	<i>Bursera excelsa</i>
	Cuajotes	<i>Bursera sp.</i>
	Casahuate	<i>Ipomoea sp.</i>

B)	Nombre común	Nombre científico
Son abundantes las especies leguminosas espinosas, tales como:		
	Mezquite Verde	<i>Cercidium sp</i>
	Ébano	<i>Pithecellobium flexicaule</i>
	Palo Fierro	<i>Olneya tesota</i>

C)	Nombre científico
En el estrato herbáceo son comunes:	<i>Butelova</i>
	<i>B. rothrockii</i>
	<i>Curtipendula</i>
	<i>Hilaria semplei</i>
	<i>Cathestecum sp.</i>

Tabla 2.1. Vegetación característica. A) Estrato arbóreo; B) Leguminosas. C) Estrato herbáceo. Fuente: EGEOMESA, 1984.

II.5. Hidrografía



El área de estudio está ubicada dentro de la región hidrológica 18, Río Balsas y específicamente se localiza en su porción suroriental, dentro de la cuenca del Río Tlapaneco, la cual limita al E y N con la cuenca del Río Atoyac, al W con la cuenca del Río Balsas-Mezcala, y al sur con la Región Hidrológica 20 y particularmente con las cuencas de los Ríos Ometepec y Papagayo (Figura 2.6); de acuerdo con la carta hidrológica de aguas superficiales (Hoja México) editada por INEGI, el escurrimiento medio anual en esta cuenca varía de 200 a 500 mm (Figura 2.7).



Fig. 2.7. Carta de Esgurrimento Superficial. Modificado de INEGI.

La cuenca del Río Tlapaneco se puede dividir en dos: la Subcuenca del Alto Tlapaneco y la Subcuenca del Bajo Tlapaneco, ubicándose el área de estudio en la primera; a su vez, esta se divide en tres sub-subcuencas, la del Río de la Montaña, Río Igualita y la del Río Tlalixtaquilla (EGEOMESA, 1984). Cuba libre, se localiza en la región de la cuenca del Río Igualita.

La Subcuenca del Alto Tlapaneco tiene una extensión superficial aproximada de 3033.7 km². El escurrimento de esta subcuenca, está controlado por la estación hidrométrica Teponahuazo, ubicada al sur de Ixcateopan, Guerrero, y de acuerdo con las mediciones de la estación y datos obtenidos del Sistema de Información de Aguas Superficiales (Fig. 2.8), tiene un gasto medio de 25.2 m³/seg durante el periodo comprendido de



1964 a 1994, teniendo un gasto máximo de 2400 m³/seg en septiembre de 1974 y un mínimo de 0 m³/seg en repetidas ocasiones.

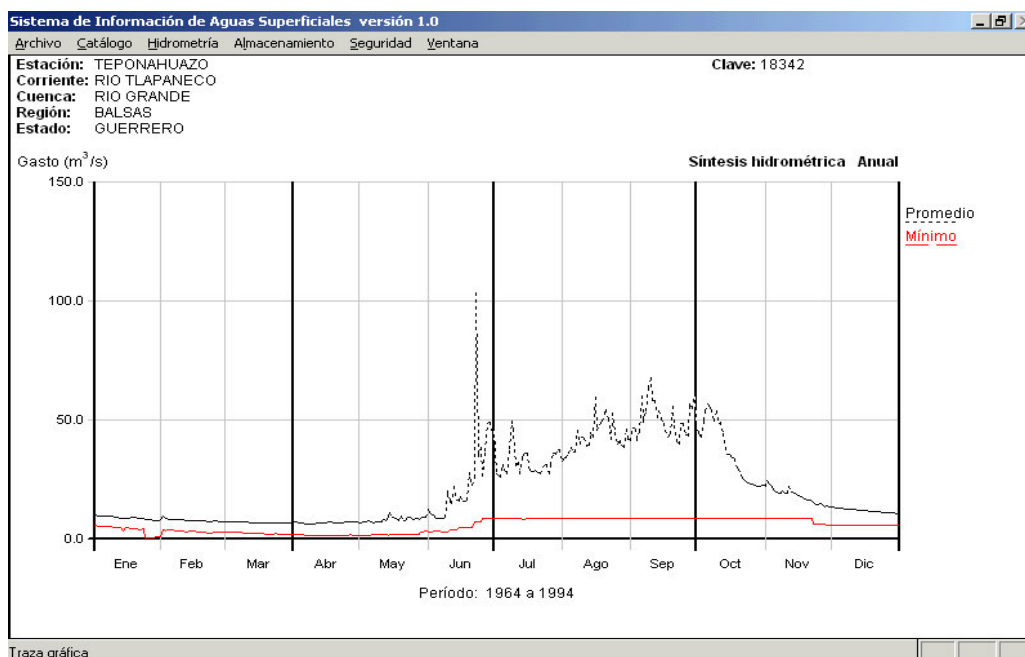


Fig. 2.8 S.I.A.S. Síntesis hidrométrica anual, para el periodo 1964-1994. Estación hidrométrica Teponahuazo.

II.6. Marco Geológico

El objetivo de esta sección es describir de forma ordenada la secuencia estratigráfica observada dentro del área de estudio. La Cuenca del Río Tlapaneco es una de las zonas donde se tienen los registros geológicos más completos del país; esto ha permitido conocer la historia geológica de la región, desde el paleozoico inferior al reciente (Milán, 1997).

La descripción estratigráfica construida para el presente proyecto, ha sido elaborada bajo el criterio de distintos autores, los cuales han hecho estudios previos en la zona.

II.6.1 Fisiografía

De acuerdo con INEGI, el Estado de Guerrero está enclavado en dos Provincias Fisiográficas, la Sierra Madre del Sur, que abarca casi la totalidad del estado y el Eje Neovolcánico que cubre una mínima parte, solo al noreste del estado, en los límites con los estados de Puebla y Morelos (Fig. 2.9); de acuerdo con Raisz (1964) sólo pertenece a la provincia de la Sierra Madre del Sur.

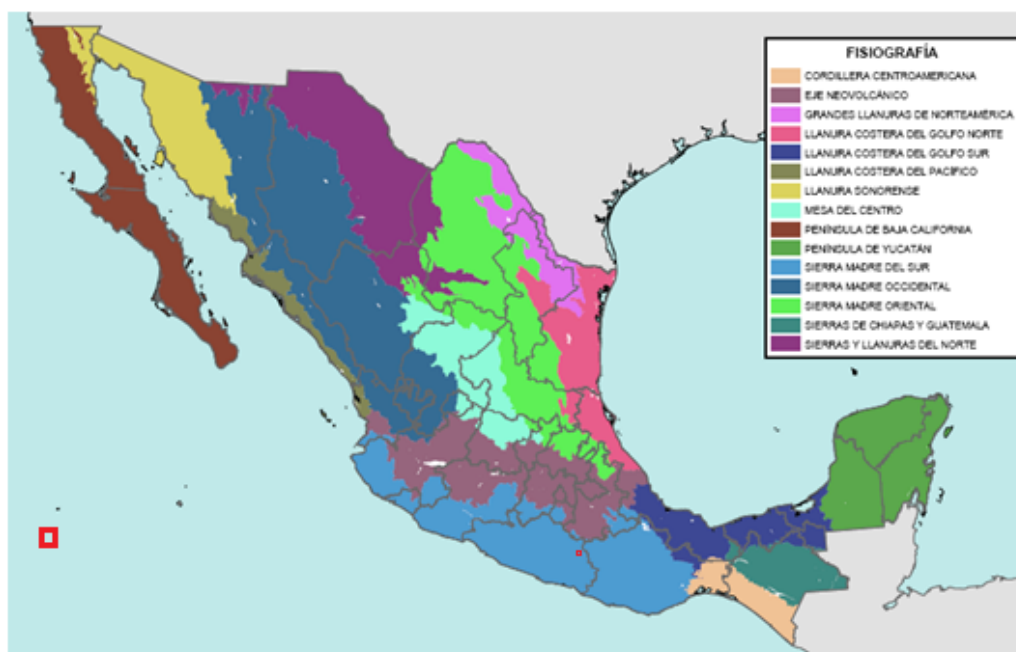


Fig. 2.9 Provincias Fisiográficas de México. Fuente INEGI

A su vez el estado, se divide en cinco subprovincias bien definidas, de las cuales cuatro tienen una orientación E-W, mientras que la restante es N-S (Fig. 2.10).

Las partes altas están constituidas por las **Sierras del Norte**, con orientación N-S y caracterizadas por la ruptura de pendiente que se observa en las laderas australes, donde las sierras desarrollan cantiles independientemente del material geológico que las componen, y por la **Cordillera Costera del Sur**, que se desarrolla a lo largo de casi 500 km, paralelamente a la Costa del Pacífico, y que posee la característica de tener su cresta a una altitud casi constante, de poco más de 2,000 m.s.n.m. Sin embargo, cuenta con algunas prominencias que sobrepasan los 3,000 m.s.n.m. el cerro Teotepec con 3,550 es el más alto.

Entre los 800 y los 1,200 m.s.n.m., se presenta una ruptura clara de pendiente, misma que permite distinguir el cuerpo central de la sierra las laderas hacia el sur, correspondientes a la Vertiente del Pacífico, tienen una pendiente uniformemente fuerte y se denominan **Lomeríos de la Vertiente Pacífica**, que aproximadamente a 200 m.s.n.m. se convierten en las **Planicies Litorales**.

Las laderas hacia el norte que drenan al Balsas son más extendidas, presentando disecciones importantes, y forman la unidad fisiográfica de la **Depresión del Balsas**, con elevación de aproximadamente 300 a 1,000 m.s.n.m.



Fig. 2.10 Fisiografía del Estado de Guerrero. Fuente: Monografía Geológica-Minera, Estado de Guerrero (C.R.M., 1999).

Cuba Libre, al igual que todo el municipio de Xalpatláhuac, se localiza en la subprovincia de la Cordillera Costera del Sur.



II.6.2 Geología

Para determinar las unidades rocosas de la zona se recopiló información estratigráfica y geológica, para de esta manera tener claro el marco geológico prevaleciente en la región.

La geología del Estado de Guerrero es muy compleja, debido a que la entidad se encuentra dividida en diferentes terrenos tectonoestratigráficos, con estratigrafías variadas, pertenecientes a cuencas de depósito, unidades corticales y oceánicas, de tamaño, litología, deformación y edades variables.

Guerrero está situado en el borde sudoccidental de la placa Norteamericana, en la región de la fosa de Acapulco, donde se sumerge y sumergieron placas oceánicas, que han formado durante su historia geológica depósitos relacionados con arcos insulares y mares marginales, dando origen a varios tipos de depósitos vulcanosedimentarios y sedimentos marinos y continentales (terrenos Guerrero, Mixteco y Xolapa) (Consejo de Recursos Minerales, 1999).

Para el desarrollo del presente proyecto, resulta irrelevante la descripción geológica de los terrenos Guerrero y Xolapa, no obstante, debido a que el área de estudio se localiza en el Terreno Mixteco, se describirá de forma general la secuencia estratigráfica del mismo.

El terreno Mixteco es el Único de los terrenos guerrerenses al que con seguridad se le conoce basamento, formado por el Complejo Acatlán, el cual consiste, en filitas y cuarcitas principalmente y esquistos de todo tipo, gneises, granitoides e intrusiones de rocas máficas y ultramáficas en menor grado. Sobre éste, se depositaron rocas sedimentarias marinas carbonífero-pérmicas y mesozoicas marinas y continentales del Jurásico y Cretácico. Cerca de Olinalá, ignimbritas del Triásico(?)/Jurásico(?) cubren en discordancia los estratos del Carbonífero-Pérmico y el Complejo Acatlán. (Consejo de Recursos Minerales, 1999).

Los sedimentos jurásicos incluyen un conglomerado de cuarzo del Aaleniano-Bajociano y rocas clásticas marinas y continentales, carbón y carbonatos del Calloviano, cuya fauna liga el terreno Mixteco en el margen del Pacífico cerca de los Andes Centrales y hacia el occidente con un estrecho marino entre América del Norte y América del Sur. Otros estratos mesozoicos incluyen capas rojas del Neocomiano-Aptiano y carbonatos y



clásticos de cuenca, del Albano-Maastrichtiano, que son parcialmente correlacionables con los de la plataforma Guerrero-Morelos.

Por Último, en el Cenozoico se depositan sedimentos continentales y rocas volcánicas cubriendo a las unidades antes mencionadas. Las rocas sedimentarias cretácicas de la plataforma Guerrero-Morelos se pueden considerar como un subterreno que cubre parcialmente al terreno Mixteco

Dentro del Terreno Mixteco, podemos encontrar regiones con estructuras geológicas y secuencias de rocas distintas, por lo cual, analizar una columna generalizada para el Terreno Mixteco, no sería lo más adecuado para los objetivos de este proyecto.

Tomando en cuenta lo anterior, se describirá la columna estratigráfica de la región del Alto Tlapaneco, con base, principalmente, en un estudio y una compilación previos, EGEOMESA (1984) y Milán (1997), respectivamente.

Complejo Acatlán

El complejo Acatlán es una secuencia de rocas que originalmente fueron lutitas y areniscas que fueron plegadas y afectadas por un metamorfismo regional; formalmente fue definida por Ortega-Gutiérrez (1978).

Las rocas del Complejo Acatlán consisten principalmente en esquistos, filitas y metacuarcitas; en cantidades menores se tiene migmatitas, granitos, milonitas, anfibolitas, roca verde, metagabros, eclogitas, ofiolitas, metagrauvas, metaarcosas, metacalizas, metaconglomerados, serpentinitas y peridotitas. Los esquistos son micáceos, sericíticos, cuarcíferos, cloríticos, granatíferos y de hornblenda, muestran colores blanco, verde, rojo, gris y negro, predominando los tintes ocre donde hubo oxidación.

El espesor de este complejo no está bien definido. La edad de Paleozoico del Complejo Acatlan está apoyada por datos paleontológicos, estratigráficos y radiométricos, se tiene registrada una edad de 380 ± 6 m.a.



Lechos rojos sin nombre

Esta formación está constituida por una secuencia eminentemente terrígena formada por una alternancia de conglomerados y areniscas (EGEOMESA, 1984).

Debido a su pequeña área de afloramientos, a su composición litológica y a su nulo contenido faunístico, esta unidad no se ha podido correlacionar, sin embargo, por su posición estratigráfica es posible que corresponda al Grupo Consuelo y más específicamente con la Formación Cualac. Su edad, solo se infiere por su posición estratigráfica, o sea pre-Tecocoyunca, por lo que podría considerarse del Jurásico Inferior (EGEOMESA, 1984).

Su espesor, se estima alcanza a aflorar hasta 150m.

Grupo Tecocoyunca

Erben (1956) dividió este Grupo en cinco Formaciones, cuya edad oscila entre el Bajociano y Calloviano. Comprende una serie alternante de depósitos continentales y marinos, abarcando todos los Sedimentos depositados durante el Jurásico Medio (Consejo de Recursos Minerales, 1999).

El contacto inferior con los Lechos Rojos es concordante con un marcado cambio litológico. Todos los contactos entre las 4 formaciones de Zorrillo, Taberna, Simón y Otatera son concordantes transicionales al igual que el contacto superior con la Formación Teposcolula.

La **Formación Zorrillo** es la más antigua y está constituida de areniscas y limolitas con numerosos restos de plantas terrestres así como lutitas carbonosas y mantos de carbón (EGEOMESA, 1984). Su espesor en la localidad alcanza a aflorar hasta 150 m.

La **Formación Taberna** consiste de lutitas y arcillas oscuras, lutitas calcáreas que intemperizan en colores grises y contiene abundantes concreciones fosilíferas, también existen areniscas cuarcíticas, rocas margosas y algunos bancos intercalados de caliza oscura (EGEOMESA, 1984). Su espesor aproximado es de 600m.

La **Formación Simón** está formada esencialmente por clásticos de grano medio a grueso (areniscas) y de estratificación gruesa, así como



limolitas y lodolitas. En esta no se encuentran fósiles marinos pero sí de plantas terrestres. Su espesor aproximado es de 550m.

La **Formación Otatera** está compuesta de areniscas de grano fino y estratificación delgada, limolitas de color café claro a beige, lutitas oscuras con concreciones calcáreas, y en algunos niveles se observan coquinas alteradas que a veces contienen plaquitas de yeso (EGEOMESA, 1984). Alcanza un espesor de hasta 500m.

Formación Teposcolula

Fue definida por Salas (1949). Es una secuencia de rocas, formada por calizas color crema o gris oscuro, que se vuelve blanca con el intemperismo, densa y con algunos horizontes fosilíferos con abundantes ostras pequeñas muy afectadas por la erosión en la superficie, con partes masivas y otras bien estratificadas (EGEOMESA, 1984).

Está constituida por capas gruesas de caliza microcristalina de colores gris, pardo claro y gris oscuro, en ocasiones, es ligeramente margosa, presenta algunos horizontes brechoides y reemplazamientos lenticulares de dolomita.

La porción inferior consiste en caliza gris parcialmente dolomitizada, que se presenta en capas de 0.6 a 1.9 m de espesor y en ocasiones masiva. La parte superior consiste en capas de 0.4 a 1 m de espesor de caliza pardo claro que por meteorización se vuelve gris claro. Contiene nódulos y vetillas de pedernal blanco y abundantes microfósiles del grupo de los foraminíferos, entre otros (Consejo de Recursos Minerales, 1999).

Su edad es del Albiano-Cenomaniano. Y su espesor aproximado alcanza los 1620m

Esta formación presenta dos facies, una principalmente calcárea y otra evaporítica.

Facies Calcárea. Es una secuencia constituida por calizas cuyo color de intemperismo es gris claro y crema a beige. Estas calizas tienen una textura wackestone-packstone, de estratificación gruesa, notándose microfauna bentónica, constituida por abundantes miliólidos y algunos otros foraminíferos.



Facies Evaporítica. En general esta facies está constituida por una secuencia principalmente yesífera y en menor grado contiene horizontes de calizas de textura variada. Los yesos intemperizan en gris con tintes blanquecinos. También se observan yesos con un aspecto moteado causa de que contiene cristales de yeso diseminados a manera de fenocristales, textura provocada tal vez por los efectos de un cuerpo intrusivo hipabisal que podría corresponder con un dique andesítico.

Formación Tecoyame

EGEOMESA (1984) propone este nombre para una secuencia vulcano-sedimentaria constituida por alternancia de tobas vítreas, líticas y cristalinas, cuarzoarenitas, sublitarenitas, conglomerados volcánica y calcárea, con colores de intemperismo rojo, gris y verde y en estratos que van de delgados a muy gruesos y en ocasiones masivos; llegando a tener un espesor máximo aflorante de 1900 m.

Por lo que respecta a su edad, se carece de elementos paleontológicos, ubicándola en el Cretácico Superior únicamente por sus relaciones estratigráficas y sus estilos de deformación muy similares a los laramídicos.

Formación Balsas

La formación más importante y más antigua del Terciario Continental tiene afloramientos de magnitudes variables, tanto al sur como al norte del río Balsas, con grandes variaciones en su litología, debido a la procedencia de los clastos.

Incluye conglomerados formados por clastos de caliza, de rocas volcánicas y/o metamórficas, con interestratificaciones de arcosas, margas, areniscas, limolitas, lutitas, brechas y tobas volcánicas, derrames Lávicos (andesitas y basaltos), caliza lacustre y/o yeso. La mayoría de las capas están bien compactadas, pero hay otras que casi no muestran compactación. En unos sitios, la estratificación es difícilmente perceptible, en otros, los estratos pueden variar de delgados a masivos (Consejo de Recursos Minerales, 1999).



Su espesor varía desde 200 hasta 2500m, pero en la región de interés alcanza los 1500m (EGEOMESA, 1984).

Unidad Terciario Volcánico

Esta unidad está constituida esencialmente de rocas volcánicas de composición intermedia siendo tanto piroclásticos como lavas.

Las rocas piroclásticas están formadas principalmente por aglomerados de fragmentos de rocas ígneas extrusivas de textura porfídica, redondeados de diámetro que oscila entre los 2 y 50 cm.

Las lavas son andesitas y andesitas porfíricas con abundantes fenocristales de andesina y oligoclasa embebidos en una matriz microlítica.

Su espesor es de aproximadamente 200 m.

Depósitos fluviales

Estos depósitos afloran principalmente a lo largo o en zonas vecinas, de los cauces de los ríos Tlapa e Igualita principalmente, aunque también se encuentran en los ríos perenes de la zona.

Los sedimentos fluviales de estas zonas están constituidos por conglomerados cuyos principales componentes son fragmentos de cuarzo, rocas volcánicas, tobas, areniscas, clastos de areniscas cuarcíferas conglomeráticas y de rocas ígneas intrusivas de tipo hipabisal, así como fragmentos de mudstones y margas, encontrándose estos clastos muy mal clasificados, llegando a ser subangulosos y también subredondeados, alcanzando a medir hasta 15 cm de diámetro y están embebidos en una matriz arcillosa con algo de carbonatos disueltos (EGEOMESA, 1984).

Su espesor fue estimado en 250m.



II.6.3 Geología Económica

Cuba Libre se encuentra asentada principalmente sobre parte del Grupo Tecocoyunca y la Formación Teposcolula.

Para los objetivos del presente proyecto es importante el análisis de estas formaciones, debido a que con base en la permeabilidad que presenten, se podrá determinar si son o no adecuadas para alojar un acuífero. Además, al tener clara la litología, se podrá hacer una interpretación más adecuada tanto de la Sísmica de Refracción, como de los Sondeos Eléctricos Verticales.

II.6.3.1 Características hidrogeológicas de las formaciones aflorantes.

Grupo Tecocoyunca

Este grupo se considera prácticamente impermeable (EGEOMESA, 1984), esto debido a su alto contenido de lutitas; solo la formación Simón tiene mayores posibilidades de ser un acuífero, ya que a pesar de estar compuesto de areniscas cuarcíferas, con una porosidad y permeabilidad no muy buena, esta se ve incrementada por el grado de fracturamiento que presenta (EGEOMESA, 1984).

Formación Teposcolula

Esta formación se presenta en el área en 2 facies, una calcárea y una evaporítica.

La facie calcárea por su distribución y espesor, por su posición estratigráfica y por su gran fracturamiento y disolución se considera como la que tiene las condiciones más favorables para permitir la circulación permanente del agua subterránea (EGEOMESA, 1984).

La facie evaporítica por su constitución litológica, ofrece nulas posibilidades para la circulación de agua subterránea, pudiendo funcionar como una excelente barrera que impida la circulación de los recursos subterráneos.



III. MARCO TEÓRICO

III.1 Sondeos Eléctricos Verticales

III.1.1 Clasificación de los Métodos Electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos tienen una gran variedad de técnicas de adquisición, aplicación e interpretación; esta variedad viene dada fundamentalmente porque un campo electromagnético se puede crear y auscultar en el terreno por diversos procedimientos (V. Iakuboskii, 1980).

Cada una de las técnicas involucra la medición de una o varias componentes del campo eléctrico y magnético, que pueden ser producidas por un transmisor de fuente natural o artificial.

Orellana (1982), clasifica los métodos electromagnéticos considerando el tipo de fuente del campo electromagnético, de la forma siguiente:

I. Métodos de Campo Natural.

Método de potencial espontáneo

Método de corrientes Telúricas

Método Magneto-Telúrica

Método AFMAG

II. Método de Campo Artificial

Métodos de Campo Constante.

Método de las líneas equipotenciales y del cuerpo cargado.

Sondeos eléctricos.

Calicatas eléctricas.

Medición magnética de resistividades.

Métodos de Campo Variable.

Sondeos de Frecuencia.

Sondeos Transitorios.

Calicatas electromagnéticas.

Método Radio-Kip (alta frecuencia).

Método de radiografía Hertziana (alta frecuencia).

Método de Polarización Inducida



III.1.2 Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo

Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación, mediante otro par de electrodos, de la diferencia de potencial (lo cual se detallará más adelante). La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada.

III.1.2.1 Resistividad eléctrica de los suelos

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad s como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor.

Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarlas como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos.

La resistividad de las rocas puede variar en margen muy amplio en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros. La Figura 3.1 presenta un gráfico de los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales. El fracturamiento, impregnación en agua salada, etc., pueden extender estos límites.

La resistividad de las rocas también depende de la temperatura a la que se encuentre ya que la temperatura influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. A temperaturas normales las

resistividades son muy altas. En concreto, un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico mal conductor.

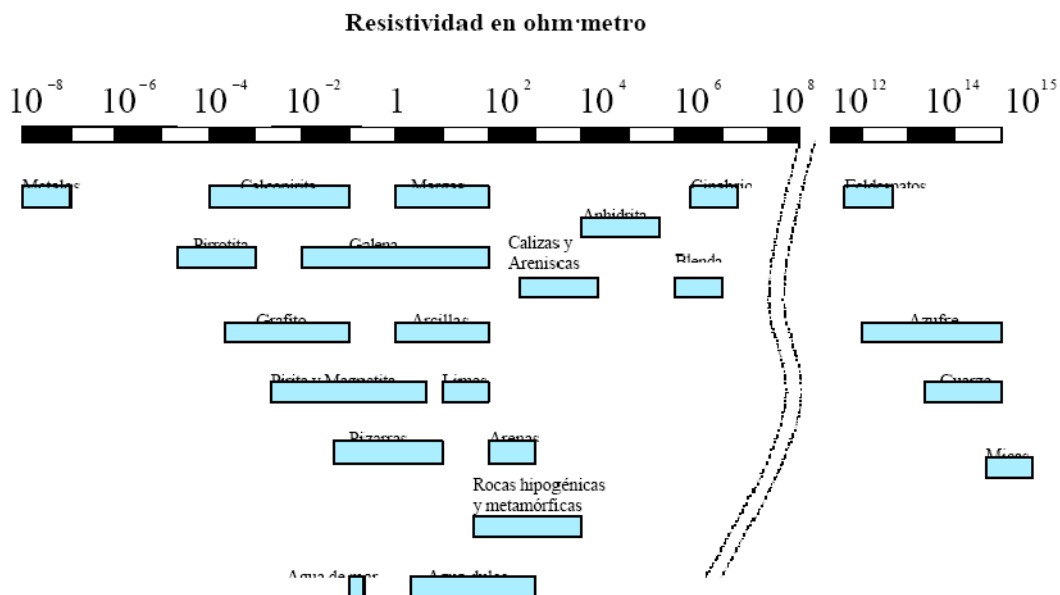


Figura 3.1. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (Orellana, 1982)

Por último, cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan *anisotropía*. La formación de estratos puede producir anisotropía. Tal es el caso de las rocas sedimentarias. En general este efecto será débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca.

III.1.2.2 Medida de la resistividad eléctrica

La Figura 3.2 muestra el principio de medida de la resistividad del suelo: se inyecta una corriente I entre el par de electrodos AB y se mide la tensión DV entre el par de electrodos MN. Si el medio es homogéneo de resistividad r , la diferencia de tensión es (Orellana, 1982):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad 3.1.1$$

Donde AM, AN, BM, BN son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la expresión:

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I} \quad 3.1.2$$

Donde:

$$g = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad 3.1.3$$

es un factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos.

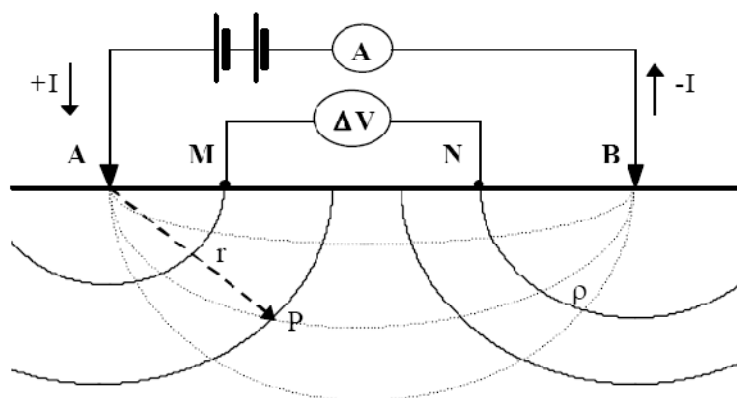


Figura 3.2. Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo.

III.1.2.3 Dispositivos tetraelectrónicos lineales básicos

En cualquier dispositivo electrónico, si conocemos el factor geométrico g , la corriente eléctrica I inyectada por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente mediante (3.1.2). Los dispositivos tetraelectrónicos lineales más utilizados son los siguientes:

Dispositivo Wenner.

Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB

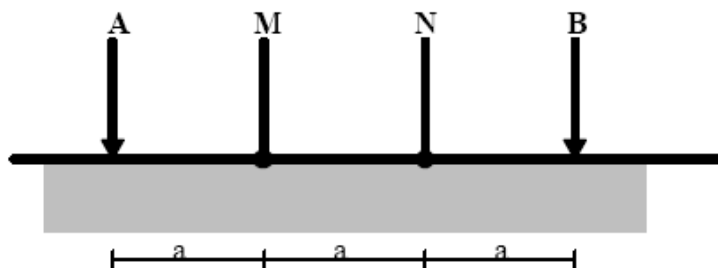


Figura 3.3. Dispositivo Wener

El factor geométrico del dispositivo se deduce de (3.1.3)

$$g = 2\pi a \quad 3.1.4$$

Se utiliza la interpretación cuantitativa. La detección y compensación de los efectos inhomogeneidades laterales requieren determinadas precauciones.

Dispositivo Schlumberger

Este es el dispositivo que fue utilizado para elaborar los Sondeos del presente proyecto.

Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es mucho menor que la de los inyectores AB (Figura 3.4). En la práctica, $AB > 5MN$.

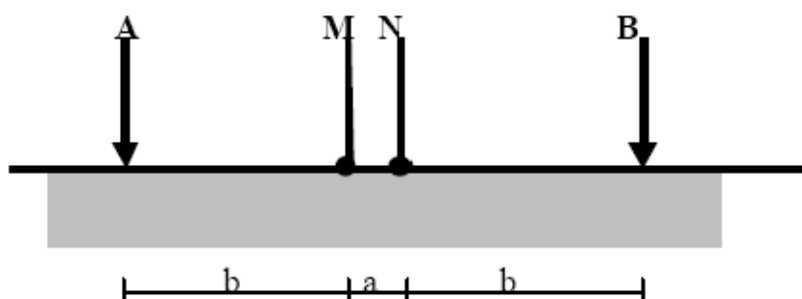


Figura 3.4. Dispositivo Schlumberger

Presenta la ventaja de ser menos sensitivo entre inhomogeneidades laterales debido a la inmovilidad de los electrodos (M y N) de potencial durante una larga serie de mediciones. Además el trabajo de campo se efectúa con mayor rapidez. Tiene la desventaja que ciertas correcciones



deben aplicarse a veces a los datos de campo antes de su interpretación y los instrumentos de medición exigen mayor sensibilidad.

El coeficiente del dispositivo en este caso es:

$$g = \pi \frac{b(b+a)}{a} \quad 3.1.5$$

Si definimos $L = b + a/2$, el factor geométrico se puede expresar como:

$$g = \pi \left(\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right) \quad 3.1.6$$

Si la distancia a que separa los electrodos M y N tiende a cero el factor geométrico queda

$$g \rightarrow \pi \frac{L^2}{a} \quad 3.1.7$$

que tiende a infinito. Sin embargo la resistividad aparente es finita ya que ΔV en (3.1.2) decrece al mismo tiempo que a . Tendremos, pues,

$$\rho_a = \lim_{a \rightarrow 0} \pi \frac{L^2}{a} \frac{\Delta V}{I} = \pi \frac{L^2}{I} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \pi \frac{L^2}{I} E \quad 3.1.8$$

donde E es el campo eléctrico. La idea del dispositivo Schlumberger consiste, pues, en utilizar una distancia $MN = a$ muy corta, de tal modo que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que medimos realmente es el campo E , el cual en la práctica se toma igual a $\Delta V/a$.

El inconveniente es que la tensión diferencial medida disminuye linealmente con la separación a y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia L . Además, la precisión de las mediciones geoelectricas de campo está muy limitada por heterogeneidades irrelevantes del terreno (ruido geológico).

En ciertos casos, el electrodo B se lleva a gran distancia de los demás de modo que no influya sobre el valor de ΔV observado. Se tiene entonces el dispositivo denominado *Schlumberger asimétrico*, o *semi-Schlumberger*.

III.1.3 Sondeo Eléctrico Vertical

Los sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) constituyen uno de los métodos de campo para determinar la variación en profundidad de las propiedades eléctricas del subsuelo. Los S.E.V. consisten en una serie de determinaciones de resistividades aparentes, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y de separación creciente entre los electrodos de emisión y de recepción.

Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado.

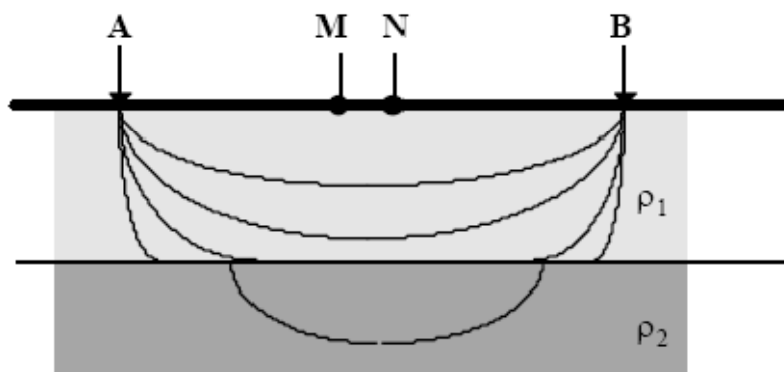


Figura 3.5. Principio del SEV. A medida que A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyector AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye.

Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982). Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca.

Podría pensarse que la *penetración* es proporcional a AB . Sin embargo esto no es cierto en general puesto que lo dicho sólo es válido para un subsuelo homogéneo.

Experimentalmente, el SEV consiste en aumentar progresivamente la distancia entre los electrodos manteniendo un punto central fijo (punto de sondeo P). A continuación se expone cómo se aplica a los diferentes dispositivos.

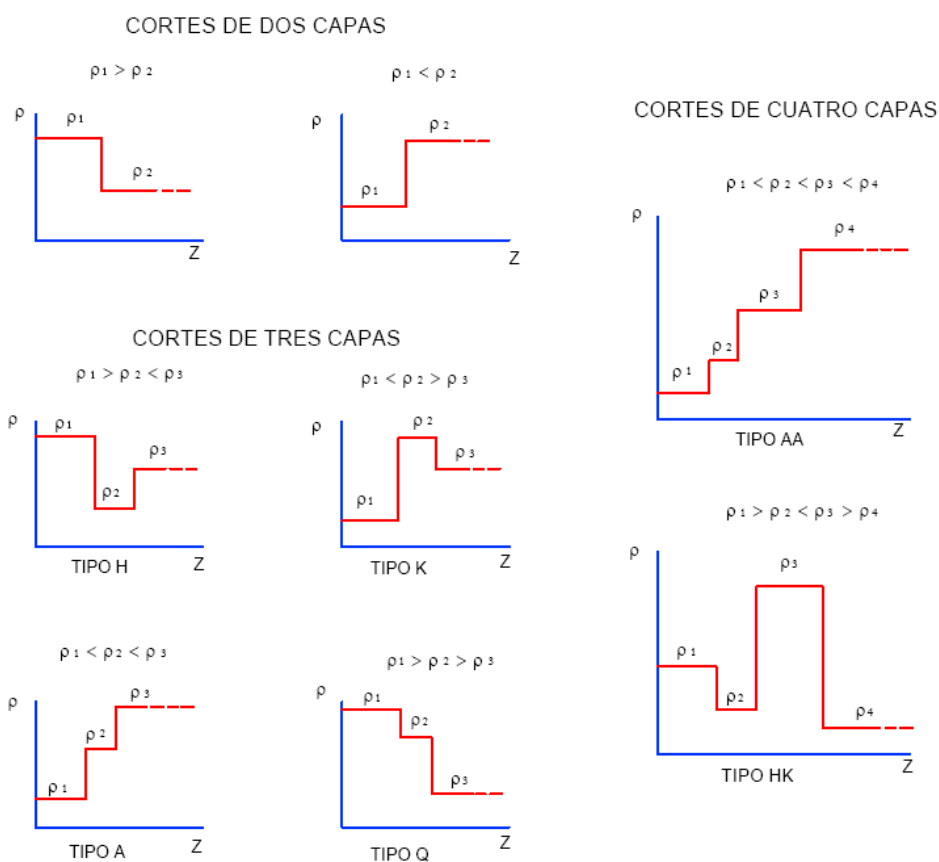


Figura 3.6. Curvas de resistividad verdadera para diversos cortes geoelectricos (Orellana, 1982)

Los datos de resistividad aparentes obtenidos en cada S.E.V. se representan por medio de curvas, en función de las distancias entre electrodos. Las resistividades aparentes ρ_a se llevan en las ordenadas y en las abscisas las distancias $OA = AB / 2$. La curva así obtenida se denomina curva de S.E.V., curva de campo o curva de resistividad aparente.



La finalidad del S.E.V. es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado. Son útiles en zonas con estratificación aproximadamente horizontal, en las que las propiedades eléctricas varían principalmente con la profundidad, más bien que lateralmente.

La especificación de espesores y resistividades de cada medio estratificado, recibe el nombre de "corte geoelectrico". Los cortes geoelectricos pueden clasificarse dependiendo el número de capas que lo componen; es decir de dos capas ($n=2$), de tres capas ($n=3$), de cuatro... tal como se aprecia en la figura 3.6.

III.2 Sísmica de Refracción

En la prospección sísmica, las ondas sísmicas se propagan hacia el interior de la tierra y se miden los tiempos de viaje de las ondas que regresan a la superficie después de sufrir refracción o reflexión en los límites geológicos presentes en el subsuelo. Estos tiempos de viaje se pueden convertir en profundidades e, incluso, se puede cartografiar sistemáticamente la distribución en profundidad de las superficies de interés geológico.

La prospección sísmica se comenzó a realizar en la década de 1920. Esto fue un desarrollo natural de los métodos sismológicos de los terremotos, establecidos ya desde hacía tiempo, en los cuales los tiempos de viaje de las ondas producidas en los terremotos se registraban en observatorios sismológicos, y eran utilizadas para deducir información de la estructura interna de la tierra.

La sismología proporciona información sobre las principales capas de la tierra, y la medida de la velocidad de las ondas de los terremotos a través de las diferentes capas proporciona importantes pistas sobre su composición y constitución.

Del mismo modo, pero a una escala mucho menor, la prospección sísmica proporciona una clara, e incluso detallada imagen de la geología subsuperficial. Esta herramienta representa uno de los métodos de prospección geofísica más importantes, tanto en términos de la cantidad de actividad prospectiva, como en el amplio rango de sus aplicaciones.

La prospección sísmica se ocupa de la estructura del subsuelo hasta una profundidad de varios kilómetros como máximo, y utiliza fuentes



sísmicas artificiales como explosiones, cuyas características de localización, ocurrencia y tipos de fuente están bajo el control directo del geofísico, lo que no ocurre con los terremotos.

III.2.1 Las ondas sísmicas

Las ondas sísmicas son parcelas de energía de deformación elástica que se propagan desde una fuente sísmica (como un terremoto o una explosión) hacia fuera.

Las fuentes sísmicas apropiadas para la prospección sísmica son aquellas que generan trenes de onda de corta vida (conocidos como pulsos), que típicamente contienen un amplio rango de frecuencias.

Las deformaciones asociadas con el paso de un pulso sísmico se pueden considerar elásticas, excepto en la zona inmediata a la fuente. Con esta asunción, las velocidades de propagación de los pulsos sísmicos están determinados por los módulos elásticos y las densidades de los materiales a través de los que pasan.

Existen dos tipos fundamentales de ondas sísmicas: ondas internas o de volumen (*body waves*) y ondas de superficie (*surface waves*).

La velocidad de propagación de una onda interna o de volumen en cualquier material viene dada por:

$$V = \sqrt{\frac{\text{modulo elástico apropiado del material}}{\text{densidad del material}}} \quad 3.2.1$$

De este modo, la velocidad de las ondas P (V_P) de las ondas internas compresivas, que involucran deformación compresiva, viene dada por:

$$V_P = \sqrt{\frac{\psi}{\rho}} \quad 3.2.2$$

y dado que $\psi = K + \frac{4}{3} \mu$, V_P pasa a ser:



$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \cdot \mu}{\rho}} \quad 3.2.3$$

y la velocidad de las ondas S (ondas de cizalla), que involucran deformación de cizalla pura, viene dada por:

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad 3.2.4$$

Puede deducirse de estas ecuaciones que las ondas compresivas (P) siempre viajan más rápido que las ondas S en el mismo medio. La relación entre V_P y V_S en cualquier material es función únicamente por el valor del coeficiente de Poisson (σ) para ese material:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1 - \sigma)}{(1 - 2 \cdot \sigma)}} \quad 3.2.5$$

y como el coeficiente de Poisson para las rocas consolidadas es típicamente 0.25, $V_P \approx 1.7 \cdot V_S$

III.2.2 Trayectorias de los rayos sísmicos en medios estratificados

En una superficie situada entre dos capas de roca, generalmente se produce un cambio de la velocidad de propagación debido a las diferencias en las propiedades físicas de las dos capas. En esta superficie la energía contenida en un pulso sísmico incidente se divide en un pulso transmitido y otro reflejado. Las amplitudes relativas de los pulsos transmitidos y reflejados, en términos de las velocidades y densidades de los dos medios, vienen dadas por las ecuaciones de Zoeppritz (Telford *et al.*, 1976).

III.2.3 Refracción crítica

Cuando la velocidad de la capa inferior es mayor, existe un ángulo de incidencia conocido como ángulo crítico (θ_C), para el cual el ángulo de refracción es de 90° . Esto da lugar a un ángulo refractado crítico que viaja a lo largo de la interfase a la velocidad mayor (V_2). Para cualquier ángulo mayor que el ángulo crítico existe una reflexión total interna de la energía

incidente (además de los rayos-S convertidos sobre un amplio rango de ángulos). Este ángulo crítico viene dado por:

$$\frac{\text{sen } \theta_c}{v_1} = \frac{\text{sen } 90^\circ}{v_2} = \frac{1}{v_2} \quad 3.2.6$$

por lo que:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad 3.2.7$$

El paso del rayo crítico refractado a lo largo del techo de la capa inferior causa una perturbación en la capa superior que viaja hacia adelante a la velocidad V_2 , la cual es mayor que la velocidad de la capa superior (V_1).

En prospección sísmica esta onda es conocida como onda de cabeza o de choque (*head wave*), y pasa de un modo oblicuo a través de la capa superior hacia la superficie (Figura 3.7). Cualquier rayo asociado con esta onda de choque presenta una inclinación igual al ángulo crítico (θ_c). Gracias a la onda de choque, la energía sísmica regresa a la superficie después de una refracción crítica en una capa situada por debajo y con una mayor velocidad.

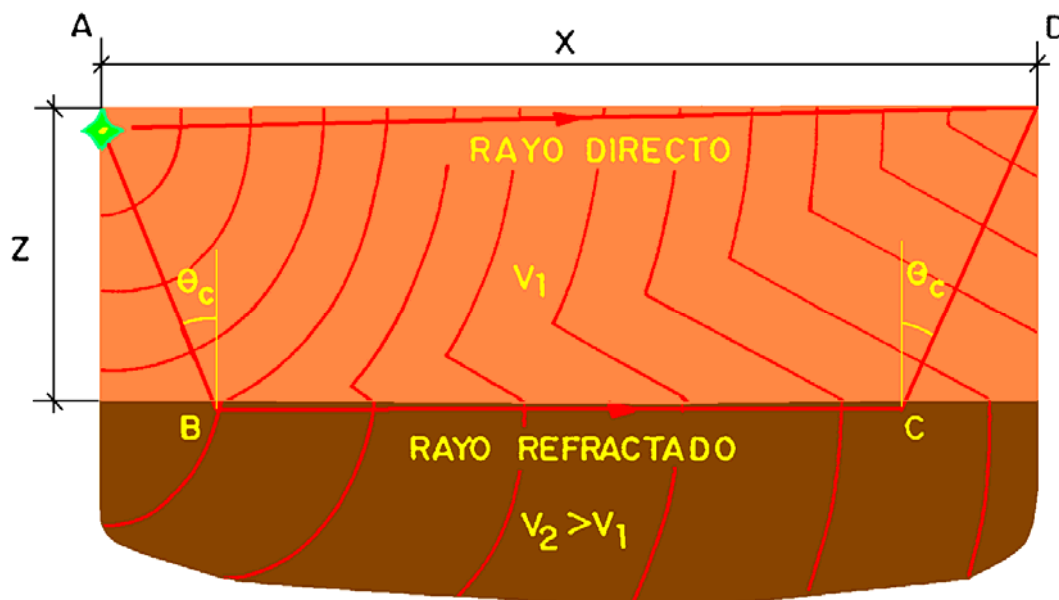


Figura 3.7. Rayo refractado incide oblicuamente sobre una interfaz con contraste de impedancia acústica.

III.2.4 Aplicación práctica de la Sísmica de refracción

La sísmica de refracción proporciona las velocidades en el medio (V_p y V_s), con lo que podemos conocer los módulos de elasticidad, compacidad, grado de alteración, etc. Los datos obtenidos en campo se representan curvas tiempo-distancia denominadas dromocronas.

Se mide la primera perturbación que llega al geófono (la onda directa, o bien las ondas refractadas). Esto es así porque a partir de un punto determinado se compensa el mayor espacio recorrido con una mayor velocidad, y llega antes la onda refractada que la directa.

Los refractores vienen definidos por cambios de impedancia acústica (densidad \times velocidad), y se produce una refracción total cuando el ángulo de incidencia alcanza un valor determinado. A continuación se presentan las relaciones entre tiempo y distancia para diferentes casos.

III.2.4.1 Caso de la Onda Directa

Se representa un gráfico del Tiempo en función de la distancia, y la onda directa queda reflejada por una recta que pasa por el origen y cuya pendiente es la inversa de la velocidad:

$$T = \frac{X}{V_1} \quad 3.2.8$$

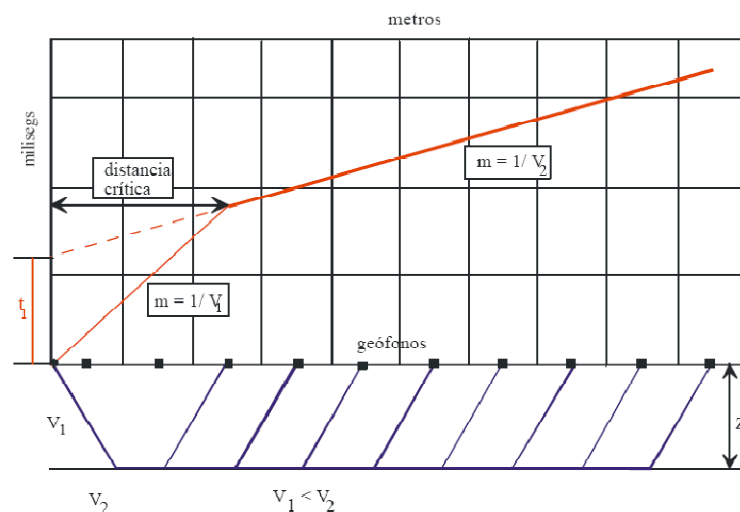


Figura 3.8. Trayectorias de los rayos directos, reflejados y refractados en una superficie cercana hacia un detector, para el caso de un modelo geológico simple de dos capas.

III.2.4.2 Caso de la Onda Refractada

En este caso se cumple que $T = T_{AB} + T_{BC} + T_{CD}$ (en la figura 3.9), y la ecuación que define el tiempo en función de la distancia para el caso de dos capas y $V_2 > V_1$ es:

$$T = \frac{Z}{\cos \theta \cdot V_1} + \frac{X - 2 \cdot Z \cdot \tan \theta}{V_2} + \frac{Z}{V_1 \cdot \cos \theta} \quad 3.2.9$$

Agrupando los términos en X, tenemos:

$$T = \frac{X}{V_2} + \frac{2 \cdot Z \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot V_2} \quad 3.2.10$$

Esta ecuación es la de una recta cuya pendiente es la inversa de la velocidad en el segundo medio ($m = 1 / V_2$), y el segundo término independiente es la ordenada en el origen de la dromocrona, que guarda relación con las velocidades en el medio y la profundidad.

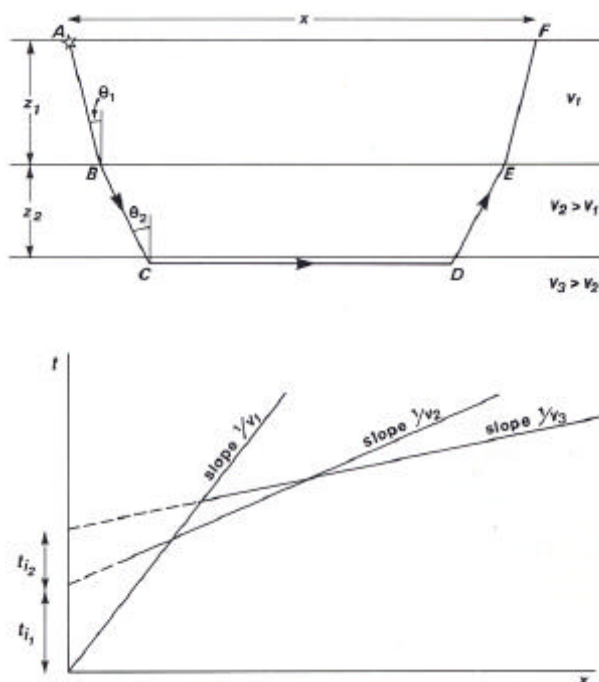


Figura 3.9. Trayectorias de los rayos directos, reflejados y refractados en una superficie cercana hacia un detector, para el caso de un modelo geológico de tres capas.



III.2.4.3 Caso de tres capas

Si tenemos dos medios, a partir de una distancia crítica recibo las refracciones de otra litología, y las ecuaciones pasan a ser las siguientes:

$$T = \frac{X}{V_3} + \frac{2 \cdot Z_2 \cdot \cos \theta_c}{V_2} + \frac{2 \cdot Z_1 \cdot \cos \theta_1}{V_1} \quad 3.2.11$$

Que corresponde a la ecuación de una recta cuya pendiente es la inversa de la velocidad en el tercer medio ($1/V_3$) y el resto el término independiente (T_2), que relaciona las velocidades y las profundidades:

$$Z_1 = \frac{t_1 \cdot V_1 \cdot V_2}{2 \cdot \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad Z_2 = \frac{t_2 \cdot V_2 \cdot V_3}{2 \cdot \sqrt{V_3^2 - V_2^2}} - \frac{Z_1 \cdot V_2 \cdot \sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_1 \cdot \sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

3.2.12

3.2.13

III.2.4.4 Caso general de n capas

$$T = \frac{X}{V_3} + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{2 \cdot Z \cdot \cos \theta_i}{V_i} \right] \quad \text{donde} \quad \text{sen } \theta_i = \frac{V_i}{V_n} \quad 3.2.14$$

III.2.4.5 Caso de un refractor inclinado y plano

Este es el caso más general, y en él las ecuaciones son en función de unas velocidades aparentes (denominadas D -down- y U -up-) debido al efecto de inclinación. Los refractores inclinados se detectan mediante tiros de ida y vuelta, donde se observa que los trayectos para dos capas no son simétricos. Las ecuaciones para los trayectos hacia abajo (D) y hacia arriba (U) son:

$$T_{DOWN} = \frac{X \cdot \text{sen } (\theta + \alpha)}{V_1} + \frac{2 \cdot Z_D \cdot \cos \theta}{V_1} \quad \text{y} \quad T_{UP} = \frac{X \cdot \text{sen } (\theta - \alpha)}{V_1} + \frac{2 \cdot Z_U \cdot \cos \theta}{V_1}$$

$$T_{DOWN} = \frac{X}{V_{DOWN}} + \frac{2 \cdot Z_D \cdot \cos \theta}{V_1} \quad \text{y} \quad T_{UP} = \frac{X}{V_{UP}} + \frac{2 \cdot Z_U \cdot \cos \theta}{V_1}$$

$$V_{DOWN} = \frac{V_1}{\text{sen } (\theta + \alpha)} \quad \text{y} \quad V_{UP} = \frac{V_1}{\text{sen } (\theta - \alpha)}$$

En este caso la inversa de la pendiente no es la velocidad de la capa inferior (V_1), sino que ésta es un valor intermedio entre las velocidades aparente U y D . Para hallar los valores de los ángulos (i , α), tenemos:

$$\text{sen} (\theta - \alpha) = m_U \cdot V_1 \quad \text{y} \quad \text{sen} (\theta + \alpha) = m_D \cdot V_1$$

de donde:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_D} - \text{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_U} \right) \quad \text{y} \quad \theta = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_D} + \text{sen}^{-1} \frac{V_1}{V_U} \right)$$

Como conozco V_0 , V_U y V_D a partir de la dromocrona, puedo obtener la V_1 real (a partir de Z_D y T_D):

$$D_D \cdot \cos \alpha = Z_D$$

En cualquier caso, el tiempo final de retorno de los dos disparos de ida y de vuelta ha de ser el mismo.

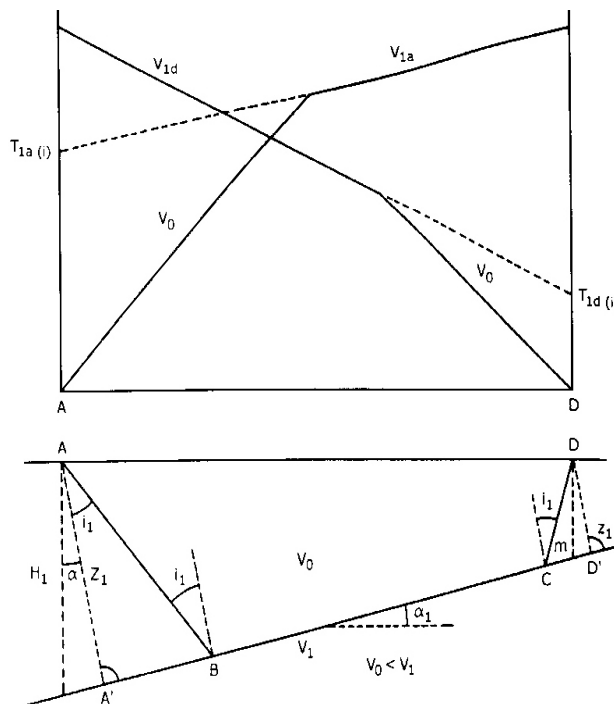


Figura 3.10. Refracción con refractor inclinado.

- T_{1a} = TIEMPO ASCENDENTE
- T_{1d} = TIEMPO DESCENDENTE
- V_0 = VELOCIDAD ENTRE LA SUPERFICIE Y EL REFRACTOR
- V_1 = VELOCIDAD DEL REFRACTOR
- V_{1a} = VELOCIDAD APARENTE ASCENDENTE (DISPARANDO EN A)
- V_{1d} = VELOCIDAD APARENTE DESCENDENTE (DISPARANDO EN D)
- $T_{1a(t)}$ Y $T_{1d(t)}$ = TIEMPOS INTERCEPTADOS EN LOS ORÍGENES A Y D



III.3 Modelado Petrofísico

El modelado petrofísico con el que se trabajó en el presente proyecto, tiene sus principales aplicaciones en la caracterización de acuíferos contaminados, ya sea por lixiviación producida en tiraderos de basura, derrames de hidrocarburos y en general por efectos antropogénicos.

No obstante lo anterior, este tipo de modelado es también una herramienta eficaz cuando hablamos de localizar acuíferos viables a explotar para consumo humano. Esto se debe a que se basa en la caracterización de la resistividad del subsuelo y el agua en el área de estudio.

III.3.1 Procedimiento de campo

III.3.1.1 Toma de muestras de agua

Para elaborar el modelado, se inicia con la toma de muestras de agua en campo. Se inicia determinando el o los puntos a muestrear, los cuales pueden ser alguna noria o pozo, del cual se extraerá una muestra de al menos 250 ml. Las muestras deben ser depositadas en frascos de plástico o vidrio limpios, los cuales serán marcados y almacenados para su análisis en laboratorio. Se deben tomar las coordenadas del punto de muestreo, para su posterior representación gráfica.

III.3.1.2 Toma de muestras de suelo

De igual forma que las muestras de agua, para tomar las muestras de suelos, se debe determinar inicialmente los puntos a muestrear. En este caso, las muestras deben estar lo más limpias posibles (libres de residuos orgánicos) y deben ser de aproximadamente 2Kg. Las muestras pueden ser tomadas en algún escarpe, que permita tomar muestras a distintos niveles o en su defecto se tendrá que utilizar equipo como un Hand-Auger para tomar las muestras a profundidad.

Convenientemente hay que empacar y marcar las muestras para su análisis en laboratorio y es necesario tomar las coordenadas de los puntos de muestreo para su representación gráfica.



III.3.2 Procesamiento de muestras en laboratorio

III.3.2.1 Muestras de agua

Inicialmente, en el laboratorio, se mide la resistividad de cada muestra de agua. Siendo de nuestro conocimiento que la resistividad depende de la temperatura, se corrigen las mediciones, referenciándolas a una temperatura de 20°C, para lo cual se usa la siguiente expresión:

$$\rho_{w20} = \rho_w(T) [1 + \alpha (T - T_0)] \quad 3.3.1$$

Donde:

T: temperatura del agua en el momento de la medición

α : coeficiente de temperatura igual a 0.0177, 1/°C

$T_0 = 20$ °C

ρ_w = Resistividad medida del agua.

ρ_{w20} = Resistividad del agua corregida a 20 °C

Una vez obtenidos los valores de resistividad para cada muestra de agua, se calcula el contenido de sales, mediante la relación:

$$C = 6 / \rho_{w20} \quad 3.3.2$$

Donde C es el contenido de sales (equivalente de NaCl) en g/l.

Esta relación es más precisa para salinidad de agua menor a 2 g/l. En caso de que se requiera trabajar con valores de salinidad mayores, se puede usar la siguiente gráfica:

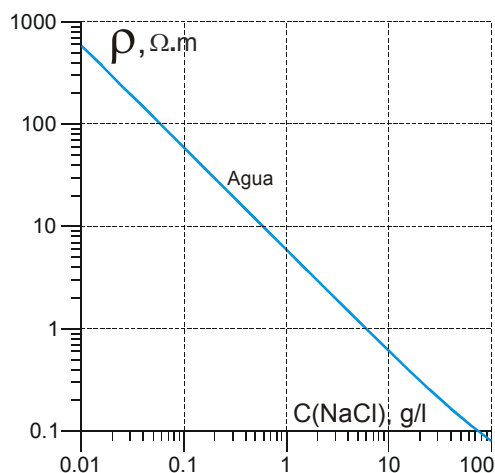


Figura 3.11. Relación entre la resistividad del agua y su salinidad para una temperatura de 20 °C



El grado de salinización del agua que contienen los poros de las diferentes rocas o suelos influye en los contrastes de resistividad eléctrica entre las diferentes litologías presentes en el sitio de estudio. Una alta salinización disminuye considerablemente los contrastes de resistividad (diferentes tipos de rocas o suelo con valores similares de resistividad) impidiendo un estudio efectivo del sitio con el método SEV. La siguiente Tabla muestra la disminución del contraste (o la diferencia) de resistividad entre arena y arcilla de acuerdo a la salinidad del agua que las satura.

Salinidad de agua (g/l)	Rango (resistividad de arena / resistividad de arcilla)
0.01	435
0.1	46
1	6
10	2

Tabla 3.1: Cambios en los contrastes de resistividad entre arena y arcilla de acuerdo a la salinidad del agua.

A manera de visualizar este fenómeno, en la Figura 10 se muestra tres diferentes valores de resistividad de agua subterránea, 1.2, 12 y 120 ohm.m, que establecen tres rangos diferentes de resistividad (R_1 , R_2 y R_3) para diferentes tipos de suelo (mezclas de arena y arcilla).

En el primer caso, la salinidad del agua subterránea es de 0.05 g/l estableciendo un rango amplio de resistividades que permite diferenciar los diferentes tipos de suelo, el segundo con valor salinidad de agua de 0.5 g/l, aunque es posible tener una diferenciación eléctrica de los diferentes tipos de suelo, el rango de valores de resistividad disminuye considerablemente, y por último, un valor de salinidad del agua subterránea de 5 g/l establece un rango más estrecho de resistividades donde es difícil diferenciar suelos con bajo contenido de arcilla.

Cuando se conocen los tipos de suelos presentes en el sitio de estudio, entonces es posible establecer el rango específico de resistividades a esperar para zonas no-contaminadas y de esta forma poder separar eficientemente las zonas contaminadas por su rango de resistividad.

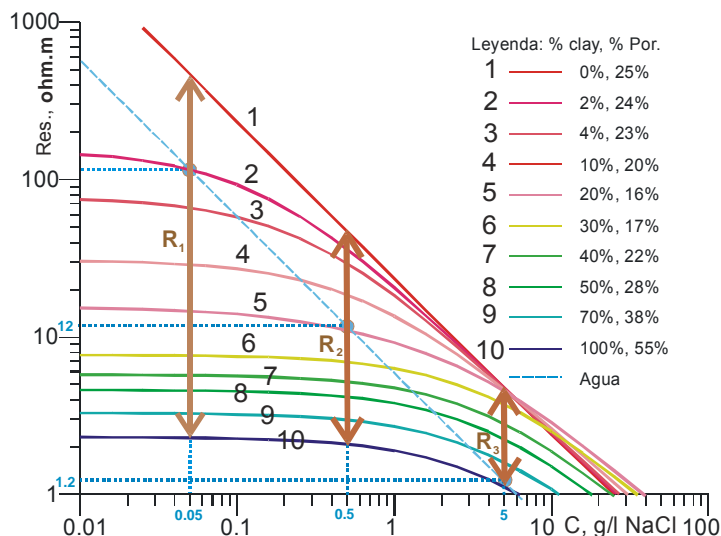


Figura 3.12. Gráfica para la relación entre la resistividad de diferentes tipos de suelo y la salinidad del agua de poro. R₁, R₂ y R₃: rangos de resistividad para diferentes tipos de suelo cuando la salinidad del agua de poro es igual a 0.05, 0.5 y 5 g/l. respectivamente.

El valor de la salinidad del agua es de gran importancia en el proceso de modelación petrofísica como se verá en epígrafe posterior.

III.3.2.2 Muestras de Suelo.

Las mediciones de resistividad en muestras de suelo se realizan en laboratorio con el objetivo de determinar las propiedades petrofísicas de suelo. La aplicación de la metodología para el cálculo de los parámetros petrofísicos consta de tres etapas:

1. Modelo teórico de formación.
2. Realización de mediciones eléctricas en laboratorio.
3. Inversión de los datos de resistividad y determinación de los parámetros petrofísicos.

La Figura 3.13 presenta un diagrama de la metodología desarrollada donde se puede apreciar el orden de aplicación de los siguientes pasos y sus resultados derivados.



Figura 3.13. Diagrama de la metodología para la determinación de los parámetros petrofísicos del suelo.

Modelo teórico: relación entre la resistividad y los parámetros petrofísicos.

El método para calcular la conductividad de agua y suelo incluye el análisis de los componentes de la mezcla de suelos con estimación de las propiedades de esta muestra y cálculos electroquímicos de resistividad de agua libre en los espacios porosos del suelo. Como el resultado se calcula la resistividad del suelo.

El modelo del suelo incluye los siguientes componentes: componente con poros anchos (arenas), con poros angostos (arcilla) y sus respectivos fluidos. Las palabras ancho y angosto son usados para dar énfasis sus

dimensiones en comparación con el grosor de de la capa doble eléctrica (DEL). Se considera capilares como partículas cilíndricas de radios definidos con la misma longitud y despreciando su tortuosidad.

En general el modelo incluye esqueleto de arena y arcilla, corriente eléctrica no conductora, elementos con conexión paralela de los capilares de arena y arcilla y elementos con conexión en serie de capilares de arenas y arcillas.

Ryjev y Sudoplatov (1990) propusieron un modelo que incluye los componentes de las formaciones poco consolidadas y el cálculo electroquímico de la resistividad del agua libre y del agua en los poros de la formación; como resultado de esto la resistividad de la formación es calculada.

En la figura 3.14 se presenta un ejemplo de la dependencia teórica de la resistividad de mezcla areno arcillosa de la salinidad de agua de subsuelo, calculada para los siguientes parámetros:

- Saturación de NaCl y saturación de suelo al 100%
- Temperatura de 20°C
- Porosidad de arena de 25% y de arcilla 55%
- CIC en arcillas de 3 g/l

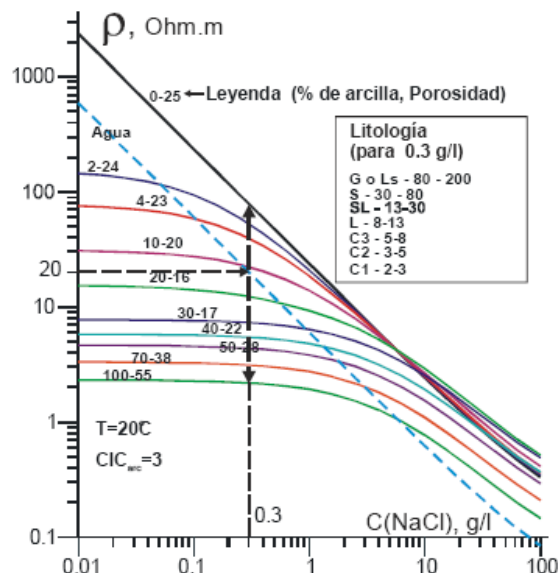


Figura 3.14.



La línea inclinada punteada es para la resistividad de agua. Si la resistividad de agua subterránea es de 20 Ohm-m se puede estimar en la figura la mineralización de agua (0.3 g/l) y leyenda litológica, donde cada tipo de suelo (arena, limo, arcilla) tiene su propio intervalo de resistividad. Conociendo la resistividad del agua del subsuelo y del suelo (a saturación de 100%) se puede estimar con la ayuda de la figura la litología, contenido de arcilla y porosidad. Viendo la siguiente figura se puede observar que la porosidad cambia con el incremento del contenido de arcilla desde la porosidad de arena (25%) hasta porosidad de arcilla de (55%) pasando por el mínimo (16%) para 20% de arcilla.

Arenas limpias con 100% de humedad tiene las resistividades 4 veces mayores que agua. La resistividad de una mezcla areno arcillosa es mayor que la del agua y a veces arena (con salinidad de agua alta) debido a la mezcla de porosidad menor así para arenas. La resistividad es menor que la de agua y arena (con salinidades bajas).

Se ha aplicado la información obtenida durante análisis estadístico al algoritmo del cálculo de la resistividad del suelo, considerando parámetros como porosidad, contenido de arcilla, humedad, CIC y temperatura. La resistividad de suelo depende primeramente de la porosidad, después de la humedad, radio capilar de arcilla, contenido de arcilla y después de CIC (para salinidades bajas). La influencia de temperatura es igual para todas las salinidades.

Se consideran un medio poroso no consolidado de dos componentes principales: arena y arcilla. Este es un modelo heterogéneo. Se debe considerar el suelo como un modelo de varios componentes. El primer componente (arena) contiene poros anchos, el segundo (arcilla) contiene poros angostos, el fluido en los poros de arena y arcilla es el siguiente componente.

El modelo de mezcla de multicomponentes (arena y arcilla) puede incluir conexiones en serie y en paralelo de los capilares de arena y arcilla. En una conexión paralela la arcilla está distribuida como una película en las paredes de capilares en las arenas, mientras que con la conexión en serie la arcilla está distribuida como corchos en los capilares de arenas.

Por lo que tomando en cuenta este modelo es posible generar curvas teóricas del comportamiento de la resistividad eléctrica de cualquier suelo compuesto de arena y arcilla (en cualquier proporción) con respecto a la



salinidad del agua de poro, en base a la variación de los parámetros petrofísicos e hidrológicos: contenido de arcilla, porosidad, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y conductividad hidráulica.

Realización de mediciones eléctricas en laboratorio

Existen diferentes tecnologías de medición donde la resistividad puede ser medida para diferentes niveles de saturación de la muestra, para diferentes salinidades del agua que satura la muestra o para diferentes frecuencias de la señal eléctrica.

Partiendo de la necesidad de tener mediciones de resistividad en función de la mineralización del agua de poro se desarrollo una metodología para el cumplimiento de esta etapa que incluye un procedimiento para la preparación de la muestra de la formación poco-consolidada y otro procedimiento para realizar las mediciones eléctricas experimentales en laboratorio.

- Preparación de la muestra.

Una vez colectada en campo la muestra de la formación objeto de estudio ésta es sometida a un proceso de secado y homogenización. Posteriormente, son llenados de esta muestra homogenizada cinco (5) resistivímetros similares con el diseño expuesto en la Figura 3.15.

El resistivímetro consiste de un recipiente plástico rectangular. En cada cara menor del recipiente fue colocado un electrodo de corriente (electrodos A y B), los cuales están conectados a cualquier equipo de resistividad (ERA, SARIS, SYSCAL, etc.). En una cara mayor se colocaron dos electrodos de medición de potencial (M y N) para la obtención de las mediciones de voltaje, las que son registradas en el medidor del equipo de resistividad.

Una vez que la muestra de suelo es colocada en el resistivímetro, se le añade agua de cierta salinidad (diferente para cada resistivímetro en el rango entre 0.1 y 80 g/l) de manera tal que la muestra es saturada al 100%. Los autores recomiendan seleccionar las aguas en los 5 rangos siguientes de salinidad: 0.1 – 0.3 g/l; 0.8 – 2 g/l; 5 – 7 g/l; 15 – 25 g/l y 50 – 80 g/l, respectivamente.

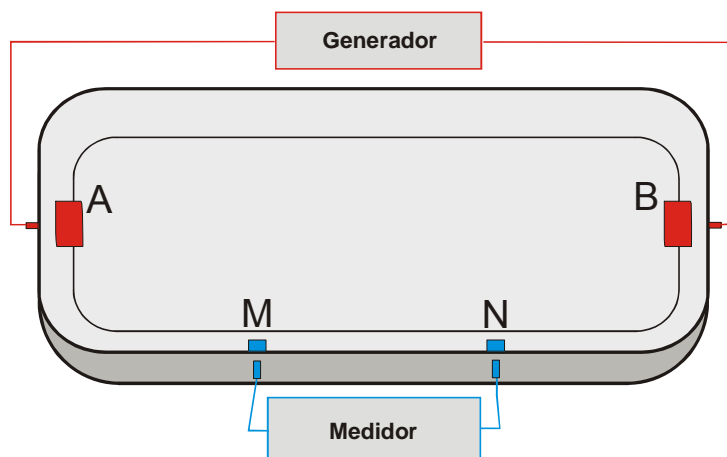


Figura 3.15: Resistivímetro

Posteriormente, la muestra debe ser tapada para evitar la evaporación de agua y esperar 1 hora a que se establezcan los procesos físico-químicos que ocurren entre el fluido incorporado y el suelo.

En resumen, con el fin de evitar errores en las mediciones eléctricas, durante el proceso de preparación de la muestra deben seguirse las siguientes instrucciones:

1. Homogenización completa de la muestra (de aproximadamente 2 Kg de peso), posteriormente separarla en 5 diferentes porciones y llenar los 5 resistivímetros.
 2. Una vez preparadas las diferentes soluciones, esperar 1 hora antes de su uso (garantiza una disolución completa).
 3. Saturar la muestra al 100%. Evitar sobresaturación (presencia de agua libre en la superficie de la muestra) o insuficiencia de agua en la muestra (la muestra aún absorbe agua).
- Realización de mediciones

La resistividad es medida como función de la salinidad del agua de poro que satura la muestra. Se registra la temperatura de la muestra saturada en cada resistivímetro. Posteriormente se procede a realizar las mediciones de voltaje en los electrodos MN de cada resistivímetro de la siguiente forma:

Se conectan los electrodos de potencial M y N al medidor y los electrodos A y B al generador del equipo de resistividad. A través de los electrodos A y B se inyecta la corriente (I) al resistivímetro (Fig. 12). En el



medidor se registra un valor correspondiente a la diferencia de potencial (ΔU) entre los electrodos M y N.

El valor de resistividad eléctrica se determina por:

$$\rho_{20} = K * \Delta U / I$$

K = coeficiente de calibración del resistímetro (m)

ΔU = valor de diferencia de potencial (mV)

I = corriente inyectada por el generador (mA)

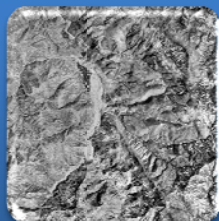
La resistividad del suelo depende de la temperatura. Para corregir las mediciones a una temperatura de referencia de 20°C se utiliza la expresión (2).

Luego, una vez que se realiza este procedimiento para cada resistímetro tenemos 5 valores de resistividad eléctrica en función de la salinidad del agua que satura la muestra ($\rho(C)$), conformando nuestro juego de datos para ser sometido al proceso de modelación y cálculo de los parámetros petrofísicos.

- Inversión y determinación de parámetros petrofísicos.

La inversión iterativa es el proceso de minimización del error de ajuste entre los valores de resistividad eléctrica calculados usando el modelo teórico descrito anteriormente y los datos experimentales medidos en laboratorio. La minimización del error de ajuste se realiza utilizando el programa *Petrofiz* desarrollado por A. Ryjov el cual permite modificar diferentes parámetros petrofísicos del modelo teórico tales como: CIC de la arcilla, radio de los capilares de arcilla, porosidad de la arcilla y de la arena. Al final de este proceso es posible determinar los valores de contenido de arcilla, porosidad de la muestra, CIC y conductividad hidráulica que le corresponde al valor mínimo de error de ajuste.

IV. METODOLOGÍA Y RESULTADOS



1. Interpretación de imágenes aéreas



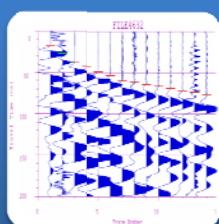
2. Modelado Petrofísico

- Recolección de Muestras de agua y suelo
- Trabajo en laboratorio



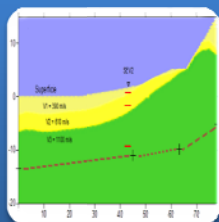
3. Estudios de campo

- Adquisición de datos sísmicos
- Adquisición de SEV



4. Trabajo de gabinete

- Interpretación Sísmica
- Interpretación de SEV



5. Análisis de resultados

IV.1 Interpretación de imágenes aéreas

Esta etapa del proyecto consistió, en primer lugar, en adquirir el material fotográfico, constituido por dos imágenes aéreas escala 1:20,000, en blanco y negro, del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

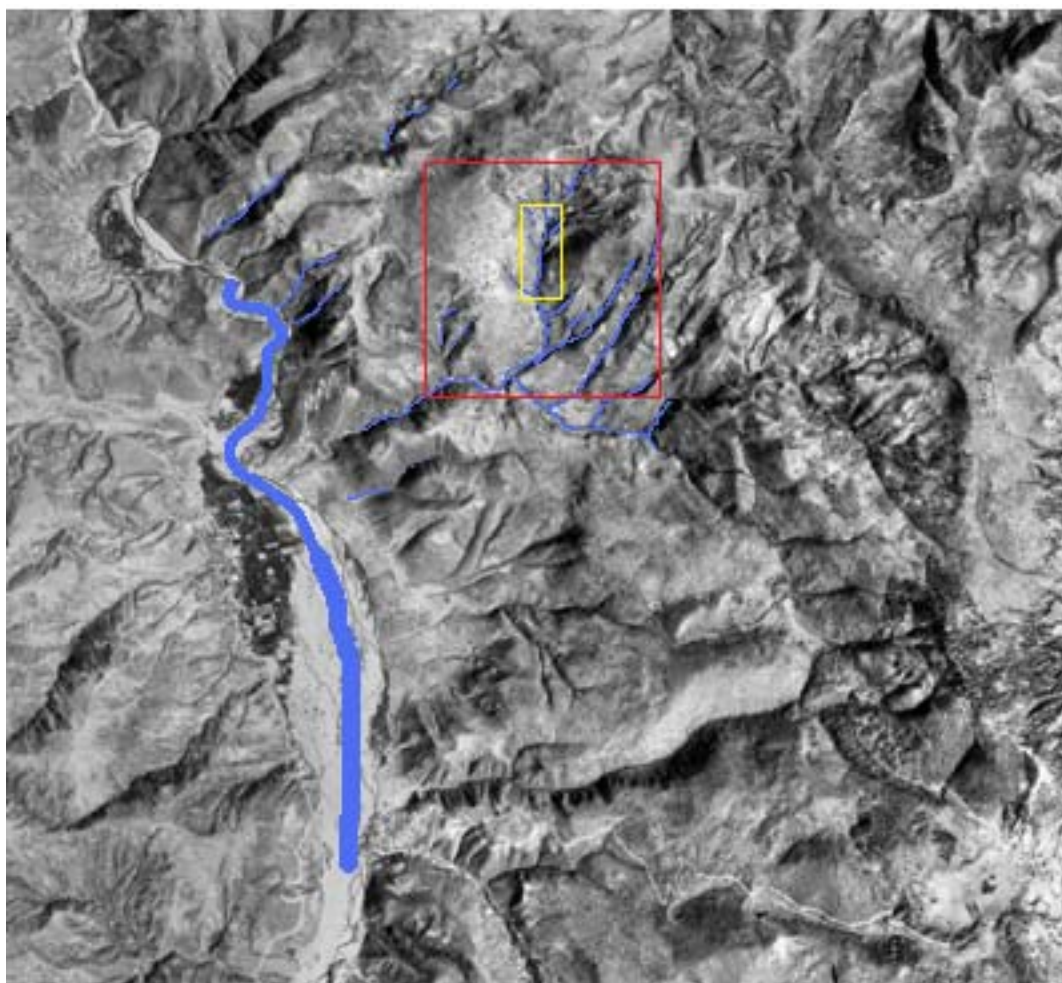


Figura 4.1. Imagen aérea clave E14D32B. Fuente INEGI. Muestra la zona de estudio. En color azul, se marcan los drenajes. El recuadro rojo, encierra el área probable de estudio, el rectángulo amarillo encierra la zona donde se planea hacer los estudios para el presente proyecto.



Una vez que se contó con el material fotográfico, se procedió a prepararlo para su estudio. Debido a la naturaleza del proyecto, no se realizó una interpretación fotogeológica completa, y solo se incluyó el análisis de los drenajes de la zona, con el objetivo de identificar las zonas potenciales de recarga, y las puntos favorables para llevar a cabo los estudios Geofísicos pertinentes.

La fotografía utilizada, fue editada de forma digital, y en ella fueron marcados los drenajes y zonas viables a estudiar.

IV.2 Modelado Petrofísico

IV.2.1 Procedimiento de campo

Durante la realización de este proyecto, se realizaron dos visitas a la zona de estudio. La primera, con el objetivo de recolectar muestras de agua y de suelo, así como confirmar los sitios propuestos mediante la fotointerpretación, para llevar a cabo la prospección Geofísica, a realizarse en la segunda visita.

Las muestras de agua y suelos, se toman con el fin de ser analizadas en el laboratorio, para determinar la salinidad (por medio de su resistividad), en el caso del agua, y la resistividad de los suelos. Lo anterior, será utilizado para determinar los parámetros petrofísicos del suelo, todo esto, como ya se ha explicado en el capítulo anterior.

IV.2.1.1 Toma de muestras de agua y de suelo

Las muestras de agua fueron tomadas de sitios en los cuales se localizaron escorrentías y en los sitios donde los pobladores han construido almacenamientos de agua. Las muestras tomadas fueron de entre 600 y 1000 ml.

Las muestras de suelos fueron tomadas y empacadas en bolsas de plástico y estas a su vez en botes, marcados para su reconocimiento. Dos kilogramos de muestra aproximadamente.

Teniendo identificados los sitios para muestrear, se inició tomando sus coordenadas, completando un total de 5 sitios de muestreo, los cuales se muestran en la tabla 4.1.

Punto	Elevación m.s.n.m.	X	Y	Muestra	
				Agua	Suelo
1	1734	553462	1933528		X
2	1676	553495	1933382	X	
3	1670	553590	1933397	X	X
3a	1670	553590	1933397	X	X
4	1560	555435	1932920	X	

Tabla 4.1. Puntos de muestreo. Tipo de muestra y coordenadas UTM.

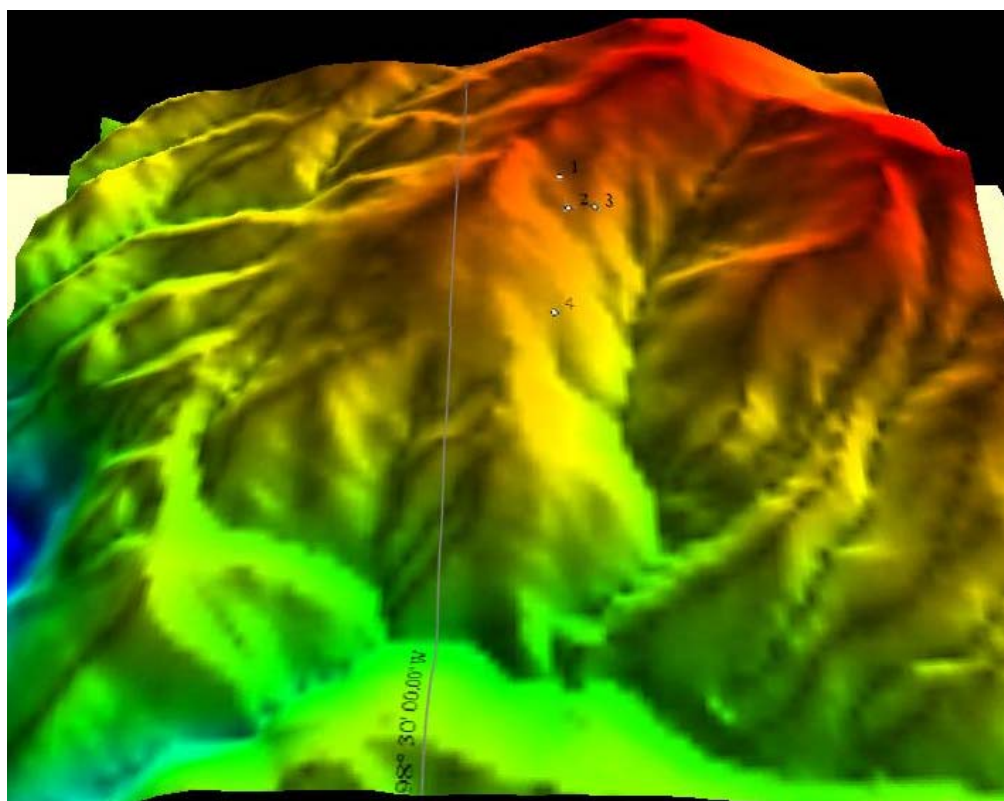


Figura 4.2. Puntos de muestreo. Mapa generado con el software Global Mapper, con proyección Nad27.

IV.3 Trabajo en laboratorio

Posterior al muestreo de agua y suelo, se procedió al análisis en laboratorio e interpretación con el algoritmo de Ryjov. El trabajo de laboratorio, fue realizado en el Instituto Mexicano del Petróleo.

IV.3.1 Análisis de muestras de agua



Para las muestras de agua, se midió voltaje corriente y temperatura en dispositivos similares al mostrado en la figura 4.3. El cual está hecho con los mismos principios que el resistivímetro de la figura 3.15, pero el propósito de este, es para tomar medidas de muestras de agua.

Figura 4.3 Resistivímetro.

IV.3.2 Análisis de muestras de suelo

Para realizar el análisis de suelos se debe secar y homogeneizar la muestra, en otras palabras se evita que existan residuos orgánicos como hojas, raíces y rocas, entre otros.

El siguiente paso es llenar 5 “resistivímetros” con las muestras de suelo, como los mostrados en la Figura 3.1 y se vierte agua con diferente salinidad hasta saturarlos al 100%.

Las muestras requieren reposar de 45 a 60 minutos para que la saturación sea completa, y hay que tomar en cuenta que no debe existir una sobresaturación, por lo que al final del tiempo de reposo, se debe retirar el agua sobrante.

Después del tiempo de espera, se procede a la medición de la resistividad y toma de temperatura. La resistividad es medida en 2 ocasiones para obtener datos más confiables.

Una vez obtenidos los datos, se procesan con el software Petrofiz para la obtención de los parámetros petrofísicos (porosidad, CIC, contenido de arcilla, permeabilidad).



Figura 4.4. Preparación de muestras de suelo, para su análisis.

IV.4 Estudios de campo

La prospección Geofísica fue realizada en la segunda visita a Cuba libre. Consistió en 2 levantamientos sísmicos y 3 Sondeos Eléctricos Verticales. Sin embargo, Sólo se presenta 1 levantamiento sísmico y 2 SEV.

En la figura 4.5 se presentan referenciados geográficamente los dos SEV y el tendido sísmico. Se aprecia claramente q uno de los sondeos fue hecho en el mismo lugar que la exploración sísmica.

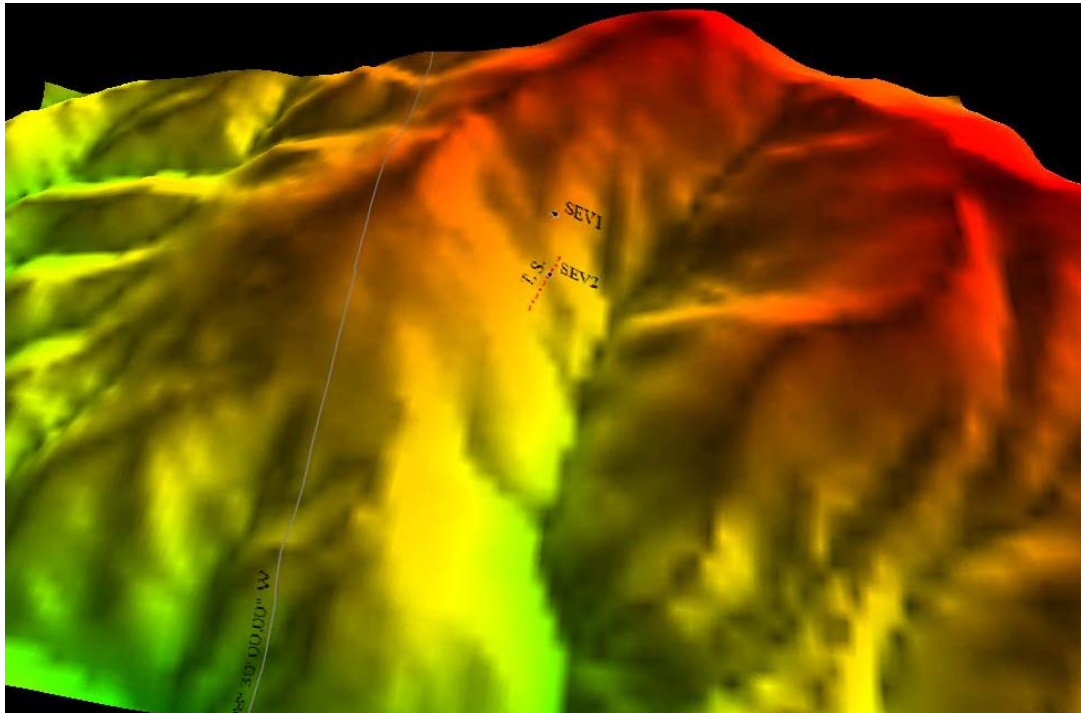


Figura 4.5. a) Se muestra el tendido sísmico y los SEV en un modelo 3D generado con Global Mapper, con proyección Nad27 (México). b) Se muestra el tendido sísmico (azul) y los SEV (1 y 2) en imágenes satelitales, fuente Google Earth.



IV.4.1 Prospección Sísmica

IV.4.1.1 Instrumentación

Para la adquisición de la Sísmica de Refracción, se utilizó un sismógrafo, de las siguientes características:

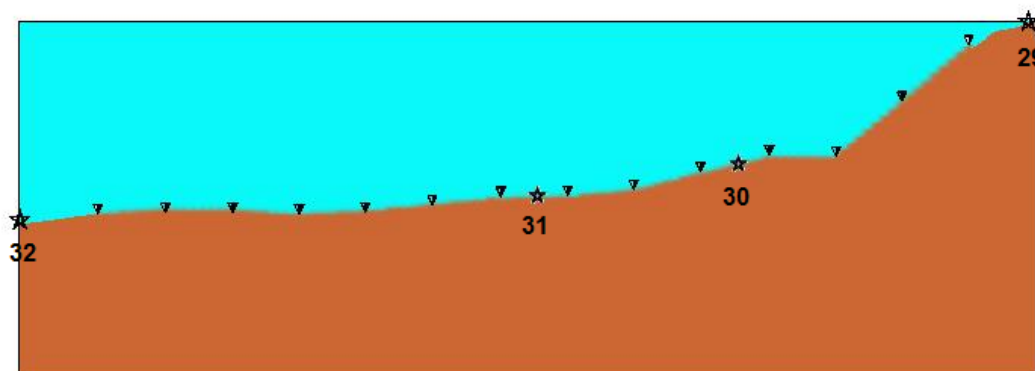
- Marca: OYO INSTRUMENTS
- Modelo: OYO GEOSPACE
- Computarizado
- Número de canales: 24, expandible a 48
- Canales auxiliares: 2
- Intervalos de muestreo de: 0.03125, 0.625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 y 4.0 ms
- Tiempo de grabación máxima: 90 s
- Floppy de 3.5" y unidad de cinta para extracción de datos
- Opciones por menús en pantalla
- Formatos de grabación: SEG-D, SEG-1 y SEG-2 a 16 bits ó 32 bits cada uno.

Además, se utilizaron geófonos, un marro de 12lb., una placa metálica de 40 Kg. y carretes de cable para las conexiones de los geófonos con el sismógrafo y la fuente.

IV.4.1.2 Adquisición de datos sísmicos

Para la adquisición de los datos sísmicos se hizo un tendido con un total de 14 geófonos los cuales tenían una separación de 6m entre cada uno. Se generaron 4 fuentes, con el objetivo de obtener una mejor resolución. Dos de las fuentes, la 1 y la 4, se ubicaron a 6m del primer y del último geófono, respectivamente; las dos fuentes restantes se ubicaron de forma equidistante (a 3m de los geófonos) a lo largo del tendido, la primera entre los geófonos 7 y 8 y la segunda entre el 10 y 11 (Fig. 4.6).

La energía mecánica de las fuentes, se generó golpeando el marro contra la placa metálica. El tiempo de grabación en el sismógrafo fue de 500ms.



★ Fuente
▼ Geófono

Figura 4.6. Configuración del tendido sísmico; se muestra la posición de los geófonos, las fuentes y los archivos en los cuales se guardó la información de cada fuente.

IV.4.2 Prospección Eléctrica

IV.4.2.1 Instrumentación

Para llevar a cabo los SEV, Se utilizaron 4 electrodos (2 de corriente, 2 de potencial), carretes de cable y un resistivímetro, con las siguientes características:

- Marca: SCINTREX
- Modelo: SARIS
- Potencia de salida: hasta 100 W
- Corriente de salida: hasta 1.0 A
- Precisión de corriente: +/- 1.25%
- Máximo voltaje de salida: hasta 500 V
- Impedancia de entrada: 11M Ω
- Rango de voltaje de entrada: hasta 40V
- Precisión de voltaje de entrada: +/- 1%
- Temperatura ambiente: -20 ° C a +55 ° C
- Alimentación: 24V
- Capacidad de medición: >10.000 (depende de la carga)
- Capacidad de memoria: >10.000 lecturas
- Pantalla: 320 por 240 VGA

- Pantalla gráfica monocroma

IV.4.2.2 Adquisición de SEV

Los puntos donde fueron realizados los Sondeos Eléctricos Verticales, son mostrados en la figura 4.5. Ambos sondeos fueron realizados con la configuración Schlumberger. Se midió la resistividad, corriente y potencial espontáneo (SP).

Para el sondeo 1, se efectuó una abertura máxima AB/2 de 60.2m, para obtener una profundidad máxima de estudio de 30m.

Para el sondeo 2, la abertura máxima AB/2 fue de 40.2m esto debido a las dificultades del terreno. Con ésta, la profundidad máxima de estudio es de 20m.



Figura 4.7. Se observa la realización del sondeo 2.



Los datos obtenidos en campo con los Sondeos Eléctricos Verticales realizados, se muestran en las tablas 4.2 y 4.3.

SEV 1				
AB/2	ρ_a	l	SP	MN
1.2	122	18.4	-12	.4
2.2	49	22.1	-14	.4
3.2	74	21	-14	.4
4.2	37	17.8	-14	.4
4/1	62	17.39	39	2.4
6	14.7	20.5	29	2.4
8	18	27.2	29	2.4
10	22.2	27.9	26	2.4
10/3	22.1	27.9	-87	8.4
15	27.4	27.5	-95	8.4
20	32.4	20	-97	8.4
30	42	152	-95	8.4
40	48	175	-95	8.4
40/10	83	17.6	31	20.4
60	100	17.2	95	20.4

Tabla 4.2. Datos obtenidos con el resistivímetro SARIS, en el sondeo 1, con coordenadas UTM 553590, 1933397.

SEV2				
AB/2	R_o	l	SP	MN
1.2	129	14	-51	.4
2.2	74	15.2	-78	.4
3.2	55.21	13	-43	.4
4.2	68.22	5.4	48	.4
4/1	68.22	5.3	45	2.4
6	46.23	8.6	48	2.4
8	33.90	16	51	2.4
10	29.10	11.2	51	2.4
10/3	18.85	14.2	41	8.4
15	25.59	14	92	8.4
20	22.83	13.9	95	8.4
30	31.62	168	97	8.4
40	38.29	165	100	8.4

Tabla 4.3. Datos obtenidos con el resistivímetro SARIS, en el sondeo 2, con coordenadas UTM 553607, 1933306.

IV.5 Trabajo de gabinete

Una vez terminado el trabajo de campo, se procedió a procesar e interpretar la información adquirida con los estudios de campo. Con este objetivo, se utilizaron distintos programas, entre los cuales se incluye: IXSEG2, Seis-Refa, Fortran, Surfer, IX1D.

IV.5.1 Interpretación Sísmica

Para llevar a cabo la interpretación de la sísmica de refracción, se inicia extrayendo los datos del sismógrafo. Esto se hace con un diskette flexible de 3½, debido al sistema del sismógrafo, se trabaja con MS-DOS. Para identificar cada archivo, el sismógrafo asigna un nombre a cada archivo, en este caso los archivos generados fueron FILE4629, FILE4630, FILE4631, FILE4632.

Los datos extraídos del sismógrafo, están en formato SEG2; en total, son 4 archivos en este formato, uno por cada fuente. En la figura 4.6 se aprecia a que fuente pertenece cada archivo. Estos archivos, son cargados con el software IXSEG2, para visualizar los sismogramas y realizar en cada uno, la lectura de los primeros arribos, lo cual se hace traza por traza.

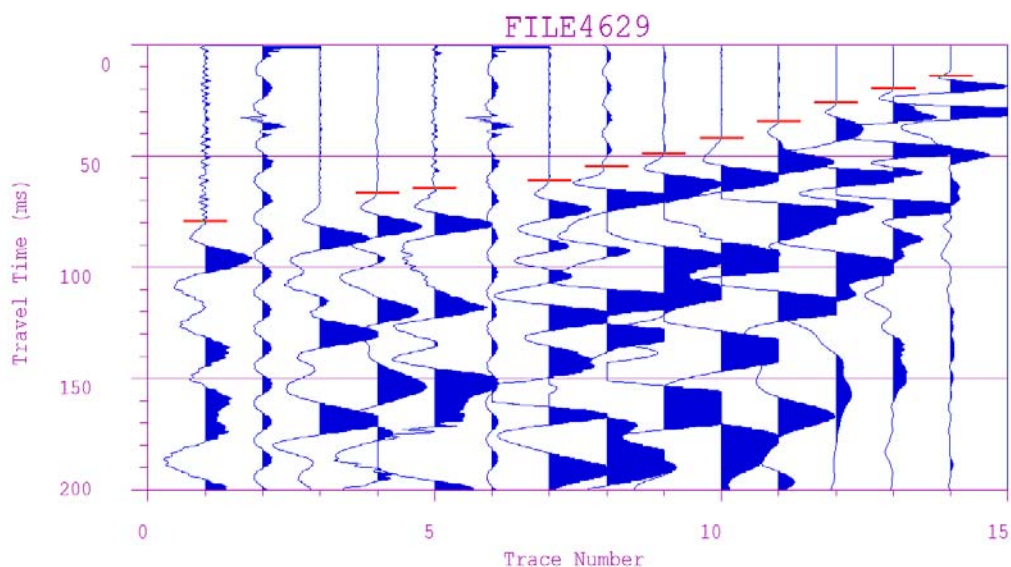
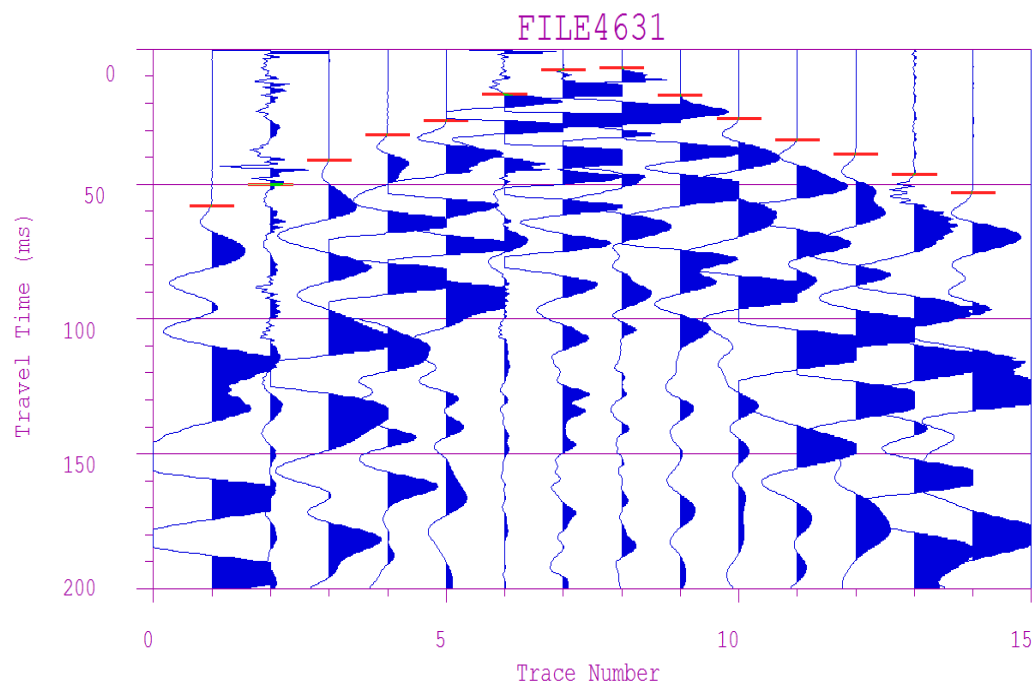
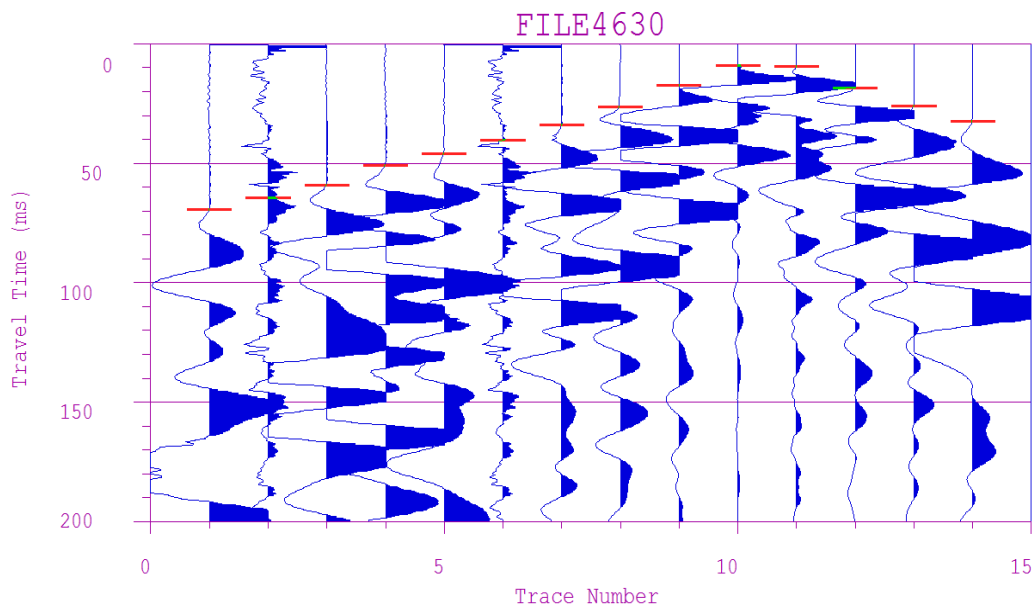


Figura 4.8. Se presenta el sismograma del archivo FILE4629. Las trazas representan la energía registrada por cada geófono. Las trazas ruidosas, como la 2 y la 6, son eliminadas.



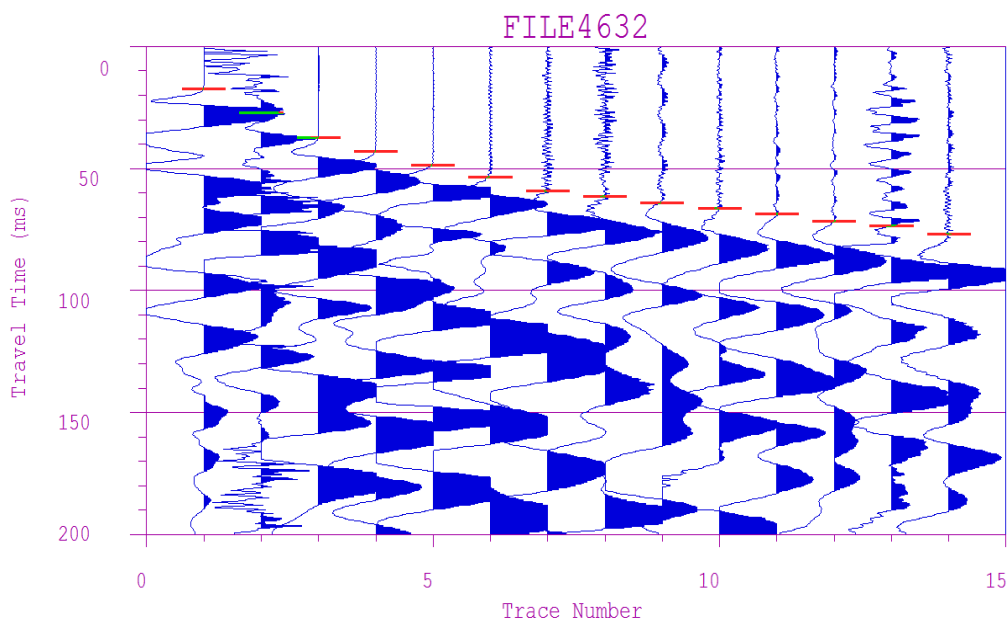


Figura 4.11. Se presenta el sismograma del archivo FILE4632.

Una vez leídos los primeros arribos, IXSEG2, almacena una base de datos, la cual se carga en Seis-Refa, para su interpretación (fig. 4.12).

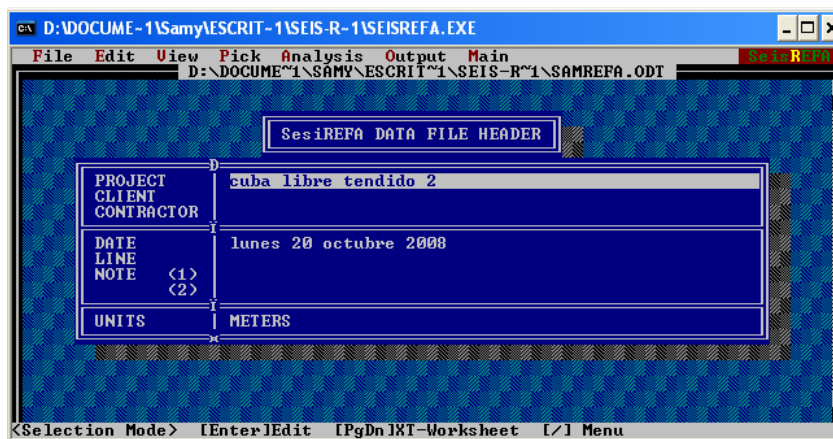


Figura 4.12. Pantalla de datos para crear archivo de interpretación en Seis-Refa.

Además de los primeros arribos, existen otros parámetros que deben ser introducidos a este software, propiedad de la OYO instruments (fig. 4.13); entre los cuales destacan:



- Posición en x de las fuentes sísmicas y los geófonos en el tendido (como se observa en la figura 4.6).
- Elevación de las fuentes sísmicas y los geófonos en el tendido.
- Distancia de las fuentes al primero y último receptor (offset).

The screenshot shows the Seis-refa software interface with a menu bar (File, Edit, View, Pick, Analysis, Output, Main) and a title bar (D:\DOCUME~1\Samy\ESCRIT-1\SEIS-R-1\SEISREFA.EXE). The main window displays a table for data entry. The table has columns for Shot Number, Shot Location, Shot Elevation, Shot Offset, No., Pos., Elev., and Travel Time (milliseconds). The data is as follows:

Shot Number	Shot Location	Shot Elevation	Shot Offset	No.	Pos.	Elev.	Travel Time (milliseconds)
1	0.0	-0.8		1	6.0	0.0	17.5
2	45.0	1.3		2	12.0	0.0	27.0
3	63.0	4.0		3	18.0	0.0	37.5
4				4	24.0	0.0	43.0
5				5	30.0	0.0	48.5
6				6	36.0	0.5	53.5
7				7	42.0	1.0	59.0
8				8	48.0	1.5	61.5
9				9	54.0	2.1	64.0
10				10	60.0	3.6	66.5
11				11	66.0	5.0	69.5
12				12	72.0	5.0	72.0
13				13	78.0	10.0	74.0
14				14	84.0	15.0	78.0
15				15			

Figura 4.13. Carga de datos en Seis-refa previo a interpretación.

El software Seis-refa, calcula automáticamente un modelo, que se ajuste lo mayor posible a los datos ingresados. Al hacerlo, muestra las dromocronas y el modelo calculado. Posteriormente, se debe ajustar el modelo calculado, a modo que sea lo más real posible, de acuerdo con los datos.

Los datos obtenidos, son el número de capas, sus profundidades y V_p . Con lo que se puede elaborar un modelo del subsuelo.

Una vez interpretados los datos, se extraen en formato ASCII. Estos datos son interpolados con ayuda de Fortran para generar una malla, la cual se graficará en Surfer para la presentación de los resultados.

Si se toma en cuenta una onda P, que incide en el subsuelo y se refleja en una capa que se encuentra subyaciendo a las capas encontradas con ayuda de Seis-Refa, es posible determinar la profundidad de esta capa, mediante la lectura en los sismogramas, de los tiempos de arribo de las reflexiones, como se muestra en la figura 4.14.

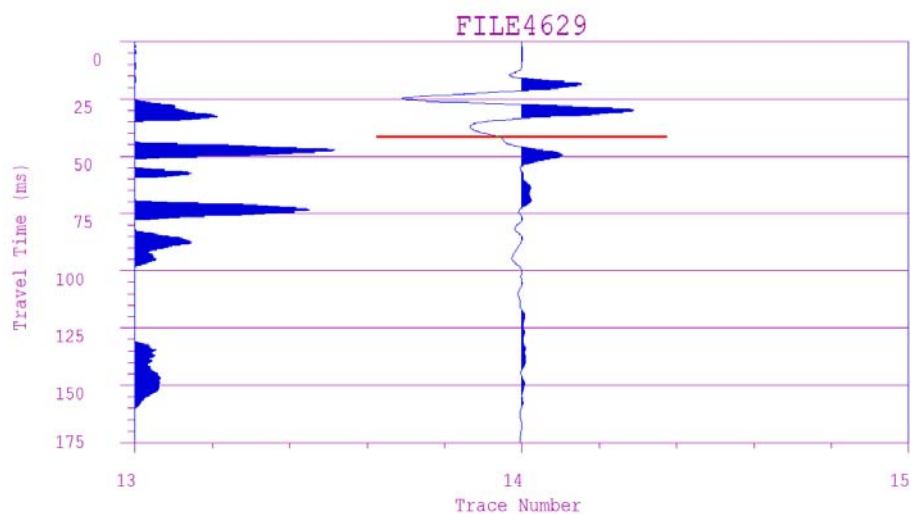


Figura 4.14. Se muestra la lectura de una reflexión en la traza 14 del sismograma 4629. La profundidad de la capa se calcula mediante de un promedio de velocidades y el tiempo de arribo.

IV.5.2 Interpretación de SEV

El procesado de los Sondeos Eléctricos Verticales se realizó con ayuda del software IX1D, el cual es de interpretación unidimensional.

Para llevar a cabo la interpretación se cargan los datos de resistividad obtenidos en campo, al igual que los datos de AB/2 y MN (tablas 4.2 y 4.3).

Los datos cargados, se muestran en las figuras 4.15 y 4.16.

Una vez cargados los datos, el software grafica los datos de resistividad, y genera un modelo unidimensional para cada SEV. Este modelo se edita y se ajusta a la curva generada en el gráfico para obtener una mayor calidad en la interpretación.

Los modelos generados, son presentados en el análisis de resultados.



Point	AB/2	MN	Apparent Resistivity	Mask
1	1.20	0.40	129.00	<input type="checkbox"/>
2	2.20	0.40	49.00	<input checked="" type="checkbox"/>
3	3.20	0.40	74.00	<input type="checkbox"/>
4	4.20	0.40	37.00	<input type="checkbox"/>
5	4.20	2.40	62.00	<input type="checkbox"/>
6	6.20	2.40	14.70	<input type="checkbox"/>
7	8.20	2.40	18.00	<input type="checkbox"/>
8	10.20	2.40	22.20	<input type="checkbox"/>
9	10.20	8.40	22.10	<input type="checkbox"/>
10	15.20	8.40	27.40	<input type="checkbox"/>
11	20.20	8.40	32.40	<input type="checkbox"/>
12	30.20	8.40	42.00	<input type="checkbox"/>
13	40.20	8.40	48.00	<input type="checkbox"/>

Figura 4.15. Datos de campo del SEV1 cargados en el software IX1D

Point	AB/2	MN	Apparent Resistivity	Mask
1	1.20	0.40	129.00	<input type="checkbox"/>
2	2.20	0.40	74.00	<input type="checkbox"/>
3	3.20	0.40	55.21	<input type="checkbox"/>
4	4.20	2.40	68.22	<input checked="" type="checkbox"/>
5	6.20	2.40	46.23	<input type="checkbox"/>
6	8.20	2.40	33.90	<input type="checkbox"/>
7	10.20	8.40	29.10	<input type="checkbox"/>
8	15.20	8.40	35.84	<input type="checkbox"/>
9	20.20	8.40	33.08	<input type="checkbox"/>
10	30.20	8.40	41.87	<input type="checkbox"/>
11	40.20	8.40	48.54	<input type="checkbox"/>
12				<input type="checkbox"/>
13				<input type="checkbox"/>

Figura 4.16. Datos de campo del SEV2 cargados en el software IX1D



IV.6 Análisis de resultados

IV.6.1 Modelado Petrofísico

Los resultados del modelado petrofísico, se presentan en dos secciones: Medición de Resistividad de Agua (MRA) y Medición de Resistividad de Suelos (MRS).

IV.6.1.1 Resultados de MRA

Se interpretaron los resultados de las muestras de agua. En la tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos, tanto de resistividad, como la salinidad de cada muestra de agua. Se puede observar dos tipos de agua en la región: un tipo de agua más blanda con 0.3 g/l (muestra 2) y otro tipo de agua (muestras 3, 3a y 5) con salinidad promedio 0.56 g/l.

Muestra de Agua	ρ	Sal._prom
2	19.9213	0.3
3	10.8525	0.55
3a	11.0752	0.54
5	10.3458	0.58

Tabla 4.4. Valores medidos de resistividad y calculados de salinidad para cada muestra de agua.

IV.6.1.1 Resultados de MRS

Después del procesado se obtuvieron las propiedades: contenido de arcilla, porosidad y conductividad hidráulica de las muestras de suelo que se muestran en la tabla 4.5. Las características de las dos muestras de suelo son similares, siendo la muestra más permeable la 4a.

Muestra de Suelo	Arcilla (%)	Porosidad (%)	Kf (m/día)
4	7	27.1	1.3
4a	6	26.9	1.5

Tabla 4.5. Propiedades petrofísicas obtenidas con el software Petrofiz, para cada muestra de suelo.



El software IX1D, genera modelos unidimensionales, en los cuales, se observa, los diferentes capas estratos y sus correspondientes resistividades.

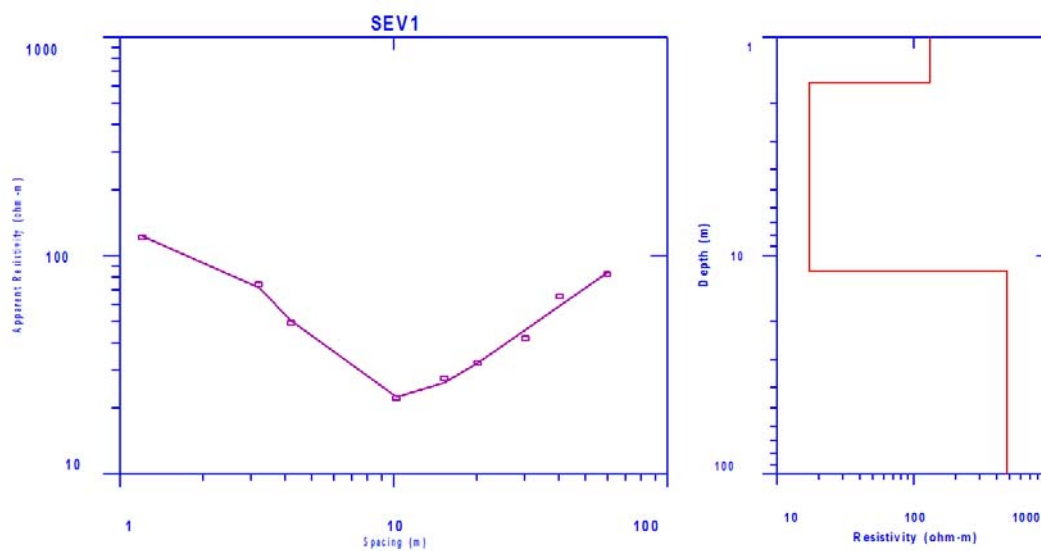


Figura 4.17. Modelo 1D generado con el software IX1D para el SEV1.

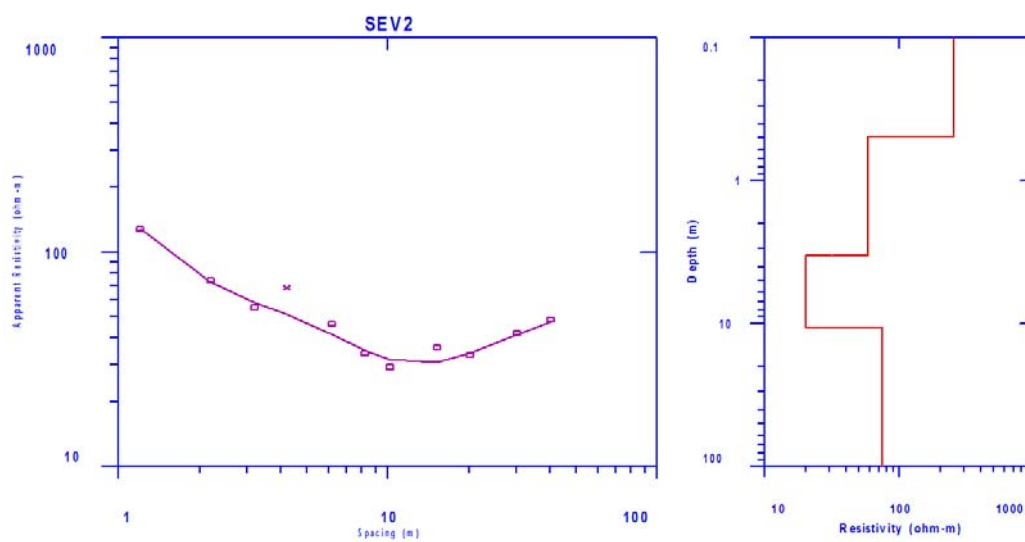


Figura 4.18. Modelo 1D generado con el software IX1D para el SEV2.



La interpretación de los SEV arrojó los resultados presentados en la tabla 4.6, para el SEV1 y en la tabla 4.7 para el SEV2.

Estrato	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Profundidad (m)
1	131	1.6	1.6
2	17	10.1	11.7
3	475	?	?

Tabla 4.6. Resultados del SEV1, interpretado con IX1D

Estrato	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Profundidad (m)
1	253	0.5	0.5
2	58	2.8	3.3
3	20	7.4	10.7
4	74.4	?	?

Tabla 4.7. Resultados del SEV2, interpretado con IX1D

IV.6.3 Análisis SEV-Modelado petrofísico

Datos de SEV		Estimación de parámetros petrofísicos tomando en cuenta resistividad del estrato y salinidad del agua subterránea 0.56 g/l.		
Estrato/SEV	Resistividad (Ωm)	Arcilla (%)	Porosidad (%)	Kf (m/día)
2/1	17	12	18	0.5
3/1	475	0	?	?
2/2	58	0	>25	72
3/2	20	9	21	0.9
4/2	74.4	0	>25	72

Tabla 4.8. Parámetros petrofísicos calculados a partir de la resistividad del estrato y la salinidad del agua subterránea.

De acuerdo con los datos de salinidad obtenidos de las muestras de agua (0.56 g/l en promedio), y las resistividades de los estratos ubicados por debajo del NF, se hace el análisis siguiente:

El estrato 2 del SEV 1 (ver estrato 2/1 en Tabla 4.8), le corresponde por sus valores de resistividad de suelo y agua, un contenido de arcilla de 12%, teniendo un Kf = 0.5 m/d. Similar situación ocurre con el estrato 3/2 del

SEV 2 (ver puntos rojos en Fig. 4.19), teniendo un 9% de arcilla y $K_f = 0.9$ m/d. Ambos estratos tiene una permeabilidad media pudiendo ser considerados como acuíferos. El estrato 3/1, por sus valores de resistividad corresponde a caliche probablemente de alta permeabilidad (punto verde en Fig. 4.19), pero su dureza encarece la perforación de la misma, siendo esto un factor que confirma la poca rentabilidad de perforar un pozo en el SEV1.

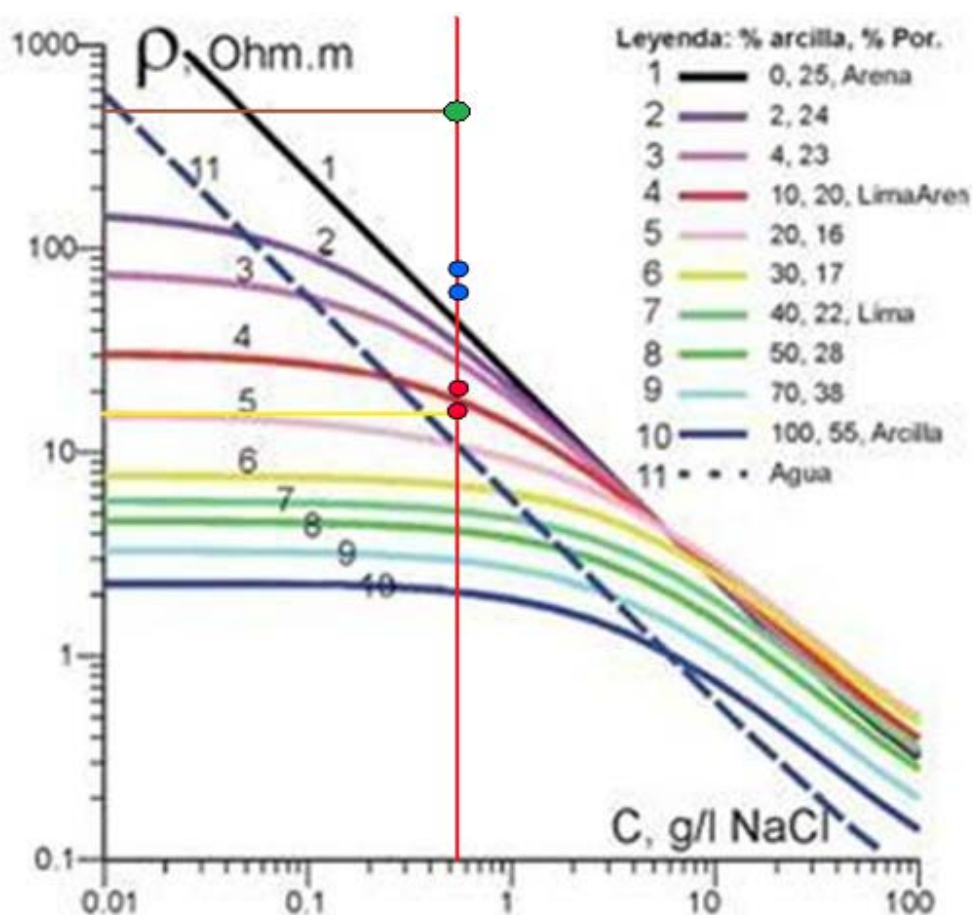


Figura 4.19. Determinación de litología para los estratos 2/1, 3/1, 2/2, 3/2 y 4/2. La línea roja, indica la salinidad del agua.

Otros dos estratos, 2/2 y 4/2, poseen alta permeabilidad (72 m/día), sus valores de resistividad de agua y suelo con 0% de arcilla, indican que estos estratos están conformados por arena gruesa y/o grava puntos azules en Fig. 4.19), lo que unido a sus espesores, indican que el SEV2 en los

intervalos de profundidad 0.5 m – 3.3 m y 10.7 m a 20 m, corresponden con acuíferos de alta eficiencia. Por lo que se concluye que el SEV2 es el sitio más adecuado para perforar un pozo somero para extracción de agua desde el punto de vista geoelectrónico.

Ciertamente, debido a la salinidad, el agua no podría usarse para consumo humano, sin embargo, es una buena fuente para satisfacer las necesidades de agua en el hogar.

IV.6.4 Sísmica de Refracción

El modelo obtenido con los datos de la interpretación de la Sísmica de Refracción, fue graficado en Surfer, y se presenta en la figura 4.20.

Se observan los 3 estratos con sus respectivas velocidades, de acuerdo con la interpretación realizada.

El cálculo de la profundidad de un cuarto estrato, por medio de reflexiones leídas en los sismogramas, da como resultado la línea punteada, que representa la existencia de una superficie de reflexión, lo cual indica también un cambio de litología y por ende, de velocidad, sin embargo, el cálculo de la profundidad de esta capa se hizo de manera puntual en los sitios marcados con una cruz (solo en 1 o 2 trazas por sismograma), es por ello que se representa de forma discontinua ya que se infiere su posición a lo largo del perfil.

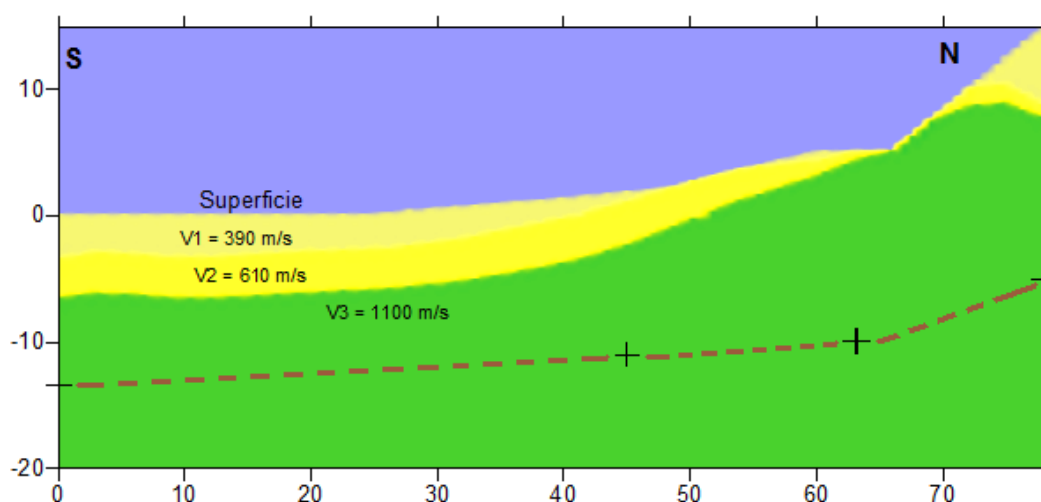


Figura 4.20. Se presenta el modelo 2D, generado en Surfer.



IV.6.5 Análisis: Sísmica-SEV

Para el sitio donde se llevó a cabo el SEV2 y la Sísmica de Refracción, se observa la presencia de dos estratos, los cuales son almacenadores de agua, de acuerdo con los datos obtenidos del Modelado Petrofísico.

Los estratos fueron registrados con ambos métodos y en la tabla 4.9 se presenta una relación entre éstos.

Estrato	Sísmica		SEV	
	Velocidad (m/s)	Profundidad (m)	Resistividad (Ω m)	Profundidad (m)
1	390	0.8	253	0.5
2	610	4	58	3.3
3	1100	12.5	20	10.7
4			74.4	

Tabla 4.9. Correlación de resultados entre sísmica de refracción y SEV.

En este caso se observa claramente que existe una relación entre los datos obtenidos con ambos métodos. En la figura 4.21, se observa la posición del SEV2, dentro del modelo de la sísmica de refracción. Se marcaron los estratos obtenidos con la interpretación del SEV2.

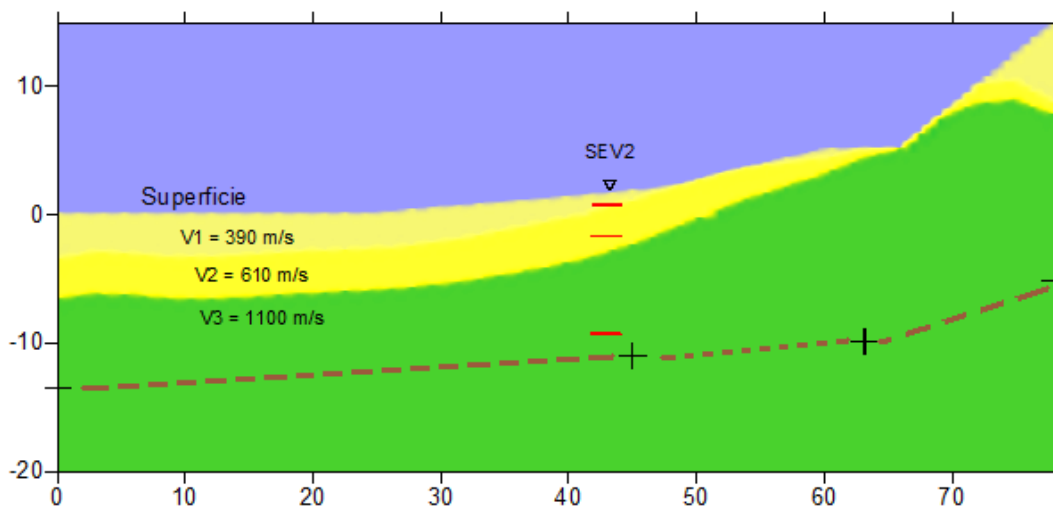


Figura 4.21. Correlación entre los resultados obtenidos con ambos métodos de exploración.

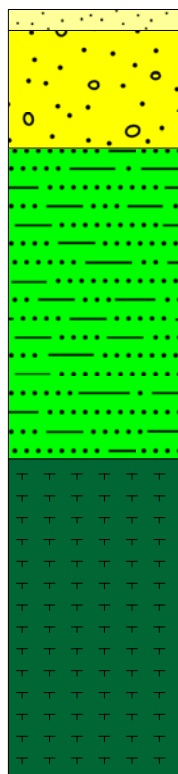


Figura 4.22.
Estratigrafía
propuesta.

Tomando en cuenta lo anterior y las observaciones hechas en campo de la litología, se propone la figura 4.22 como la estratigrafía del lugar.

En color crema se observa un estrato de sedimentos poco consolidados, no saturados de agua.

En amarillo el mismo estrato de sedimentos poco consolidados, saturado de agua.

En verde claro, se presenta una capa que de acuerdo con afloramientos observados consiste en areniscas de cuarzo, probablemente pertenecientes a la Formación Simón, del Grupo Tecocoyunca.

El verde oscuro es probable que esté compuesto de areniscas cuarcíferas muy fracturadas, del grupo Tecocoyunca.

Estos tres estratos, resultan ser los de mayor interés por contener un pequeño acuífero somero, que si bien, su agua no es de la calidad necesaria para considerarse como potable, si es posible explotarla para uso en el hogar.



V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones

A continuación se enlistan las principales conclusiones de este proyecto, para después hacer algunas recomendaciones acerca del acuífero localizado.

- La combinación de métodos Eléctricos y Sismológicos, así como la inclusión de un Modelado Petrofísico, genera una poderosa herramienta para localizar de forma efectiva acuíferos someros.
- La Sísmica de Refracción, determina claramente las estructuras del subsuelo asociadas a los acuíferos someros.
- Los Sondeos Eléctrico Verticales, delimitan las zonas del subsuelo saturadas de agua.
- Se localizó un acuífero, en el sitio donde se llevó a cabo el SEV2, lugar que los pobladores conocen como La Barranquilla. Este acuífero tiene una profundidad aproximada de 18m.
- Gracias las mediciones de resistividad de agua, se pudo aclarar que el agua localizada, excede en salinidad, por lo que no puede considerarse como agua potable.

V.2 Recomendaciones

- Como medida preventiva antes de construir cualquier tipo de obra hidráulica, se recomienda hacer un análisis químico y bacteriológico al agua, esto con el fin de evitar enfermedades entre la población.
- Tomando en cuenta que la construcción de obras hidráulicas requiere de una fuerte inversión, es primordial que se solicite apoyo a las autoridades competentes, para que sean ellas quienes se hagan cargo de la inversión correspondiente.

- En el sitio del SEV1, que se encuentra en terrenos que le pertenecen al Sr. Enrique Pérez, es viable la construcción de tanques de almacenamiento, ya que en este punto, existe una escorrentía que fluye a lo largo de todo el año. En este punto ya se tienen fozas improvisadas de las cuales la gente acarrea el agua. Cabe aclarar que no es recomendable la perforación de un pozo, ya que la litología formada por calizas, elevaría considerablemente los costos de perforación.
- En el sitio del SEV2, se recomienda la perforación de un pozo, de 18m de profundidad. En este caso, una de las mejores opciones para distribuir el agua en la población, consiste en construir un tanque de almacenamiento en el sitio (tanque 1), y otro tanque, ladera arriba (tanque 2). El agua extraída del pozo, se deberá almacenar en el tanque 1. El agua acumulada en el tanque 1 se bombeará al tanque 2, y de éste último, el agua se distribuirá por gravedad al pueblo (Figura 5.1).

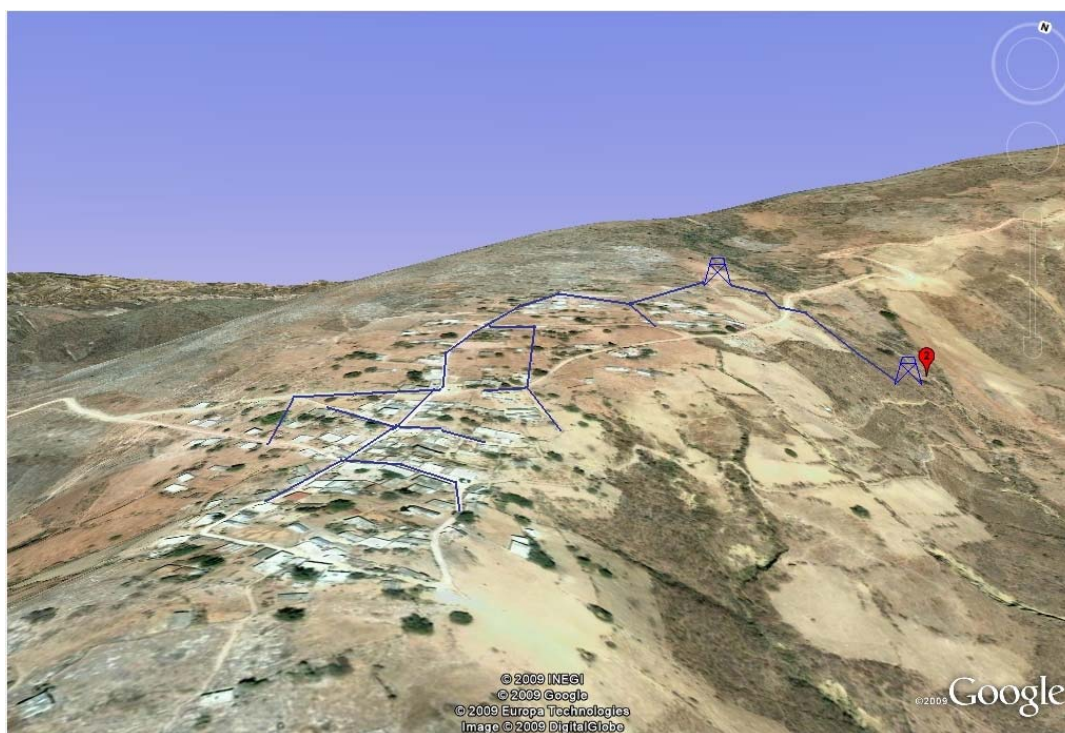


Figura 5.1. Propuesta para la construcción de una red de distribución de agua.



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Consejo de Recursos Minerales, 1999. Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero. México.
- Corona-Esquivel R.J.J., 1981, Estratigrafía de la región comprendida entre Olinalá y Tecocoyunca, noreste del Estado de Guerrero: Univ. Nal. Autón. de México, Instituto de Geología, Revista, Vol. 5, Núm. 1, p. 17-24.
- Custodio E.R., Llamas 1976. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Tomos I y II, España.
- Dobrin and Savit, 1988. Introduction to Geophysical Prospecting, 4th Edition, McGraw-Hill.
- EGEOMESA, 1984. Estudio Geológico y evaluación cualitativa del potencial geohidrológico del área Tlapa-Xalpatláhuac-Alcozauca, Estados de Guerrero y Oaxaca.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Gobierno del Estado de Guerrero, *Anuario Estadístico del Estado de Guerrero año 2000*, Aguascalientes, Ags., 2000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Gobierno del Estado de Guerrero, *Síntesis de Indicadores Sociodemográficos, 2000*.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2009). «Enciclopedia de los Municipios de México – Xalpatláhuac, Guerrero
- López Ramos, E. 1983. Geología de México. Tomos 2 y 3 UNAM. México, D.F.
- Manual *Los municipios de Guerrero*, editado por CEDEMUN.
- Milán Valdes, S. 1997. Factores geológicos e hidrológicos y prevención de daños por inundación en la montaña de Guerrero. Proyecto Terminal. UAM. México.



- Muñoz Martín, A. Elementos de prospección sísmica.
- Olmo Alarcón, M., López Geta, J.A. Ed. 2000. Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología. IGME, España.
- Orellana, E. y Mooney, H. 1966, Tablas y curvas patrón para SEV sobre terrenos estratificados. Interciencia. Madrid, España.
- Orellana, E., 1982, Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo. Madrid, España.
- Perevochtchikova, M, García Jiménez, F. Análisis cualitativo de la red hidrométrica actual del estado de Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín 61, 2006.
- Pérez Reyna, K. Análisis espacial de los aspectos demográficos, agrarios y ambientales de tres municipios de La Montaña de Guerrero. 1998. *Investigaciones Geográficas* Boletín 37.
- Raisz 1959. Land forms of Mexico. Geography Branch of the Office of Naval Research. Cambridge, Mass.
- Telford, W.M., L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, 1990. Applied Geophysics (2nd Edition), Cambridge.