



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO RESISTIVO
GEOFÍSICO DE LA
INTRUSIÓN DE AGUA
TERMAL EN EL ACUÍFERO
DE LA JOYA, BCN
APLICANDO MÉTODOS
ELÉCTRICOS

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA

MIRIAM ARACELI GUZMÁN JIMÉNEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. ELSA LETICIA FLORES MARQUEZ**

MÉXICO, D. F., 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1265

SRITA. MIRIAM ARACELI GUZMÁN JIMÉNEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Dra. Elsa Leticia Flores Márquez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**ESTUDIO RESISTIVO GEOFÍSICO DE LA INTRUSIÓN DE AGUA TERMAL EN EL
ACUÍFERO DE LA JOYA, B.C.N. APLICANDO MÉTODOS ELÉCTRICOS**

RESUMEN

- I INTRODUCCIÓN**
- II MARCO GEOLÓGICO**
- III GEOQUÍMICA**
- IV MÉTODOS ELÉCTRICOS**
- V APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS**
- CONCLUSIONES**
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**
- ANEXOS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

d.C. Universitaria, D. F., a 2 de octubre de 2008
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

JGGZ*RJPYS*srs

DEDICATORIA

Gracias Padre por los pequeños y bellos detalles, por cada cosa que me has dado, por cada cosa que me has negado, más que por eso gracias padre por ti mismo y como eres, por ti mismo y lo que eres. Hoy te vengo a dar GRACIAS.

A mis padres Braulio Guzmán Miranda y Guadalupe Jiménez Zapata, por ser quien son....

A mis hermanos Laura, Alejandro, Ana y Adriana, por aguantarme siempre...

A mis amigos Maricela, Lilia, Alma, Neri y Armando, por apoyarme y creer en mí...

AGRADECIMIENTOS

Esto va a ser un poco largo así que comencemos de una vez, primero a mis padres, sostén de mi mayor felicidad, por que todo lo que soy se lo debo a ellos, a papá por ser su orgullo, a mamá por ser tan gentil. A mis hermanos, compañeros de interminables juegos y confidentes. A mi familia, abuelas, tíos, primos, sobrinos, y a los que están en el cielo.

A mis amigos Alma, con quien siempre hacia locuras sin darnos vergüenza. A César Neri, por que hacerme reír y decir las cosas de manera que entiendo, siempre tan honesto. A Lilia y Armando, por siempre escucharme y darme una palabra de aliento. A Francisco, Raciél, Jorge, Pamela, Cecy, Alexander, Julio, Pris, Crispi, Andrés, Anselmo, Moy y a todos mis compañeros de clases por hacer más ameno el estudio.

A mi mejor amiga May, quien compartió desde el primer día de clases hasta el último conmigo, con la fortaleza que le dio a mi alma para seguir adelante, siempre en las buenas y en las malas, a veces muy seria pero siempre incondicional.

A mis profesores de carrera por sus enseñanzas. A Lulú, Edgar y Javier, por creer en mí mas de lo que yo misma creía. A la Dr. Leticia, por haberme aceptado, mostrando confianza en mí y ofrecerme este proyecto.

Al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme permitido el uso de sus instalaciones para la realización de esta tesis. A el proyecto IMPULSA y a la Comisión Federal de Electricidad, por la información proporcionada en el trabajo de campo para la elaboración de esta tesis.

Y a todos los que por mi camino cruzaron una palabra, una sonrisa, a todos ellos GRACIAS.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	<i>4</i>
RESUMEN	<i>5</i>
CAPITULO 1. Introducción	<i>9</i>
1.1. Trabajos Previos	<i>9</i>
1.2. Localización del Área de Estudio	<i>11</i>
1.3. Clima	<i>12</i>
1.4. Hidrología	<i>13</i>
CAPITULO 2. Marco Geológico	<i>16</i>
2.1. Fisiografía	<i>16</i>
2.1.1. Provincia de la Península de Baja California	<i>16</i>
2.1.2. Provincia de la Llanura Sonorense	<i>18</i>
2.2. Geología Regional	<i>19</i>
2.3. Geología Histórica	<i>21</i>
2.4. Estratigrafía	<i>23</i>
2.5. Geomorfología	<i>25</i>
2.6. Geología Estructural	<i>26</i>
2.7. Geología Local	<i>29</i>
2.7.1. Formación Alisitos	<i>29</i>
2.7.2. Formación Rosario	<i>31</i>
2.7.3. Formación Rosarito Beach	<i>31</i>
CAPITULO 3. Geoquímica	<i>33</i>
CAPITULO 4. Métodos Eléctricos	<i>40</i>

4.1. Fundamentos de la Teoría de Resistividad	41
4.1.1. Conductividad Eléctrica	45
4.1.2. Concepto de Resistividad Aparente	46
4.2. Dispositivos eléctricos	47
4.2.1. Dispositivo Schlumberger	48
4.2.2. Dispositivo Wenner	49
4.2.3. Dispositivo Polo-Dipolo	49
4.2.4. Dispositivo Dipolo-Dipolo	50
4.3. Clasificación de las Técnicas de Prospección Eléctrica de Corriente Continua	51
4.3.1. Calicata Eléctrica	52
4.3.2. Sondeos Eléctricos Verticales	52
4.3.2.1. Sondeo Wenner	54
4.3.2.2. Sondeo Schlumberger	54
4.3.2.3. Efectos laterales en el SEV y ambigüedades en su interpretación	55
4.3.2.4. Aplicaciones	55
4.3.3. Descripción de la Técnica de Tomografía Eléctrica	56
4.3.3.1. Adquisición de Datos en Campo con la Técnica de Tomografía Eléctrica	57
4.3.3.1.1. Arreglo tipo Wenner	57
4.3.3.1.2. Arreglo tipo Wenner-Schlumberger	59
4.3.3.1.3. Arreglo tipo Dipolo-Dipolo	60
4.3.3.2. Procedimiento para la Inversión de Datos	62
4.4. Método de Interpretación con las Diferentes Técnicas de Corriente Continua	63
CAPITULO 5. Aplicación de los Métodos Eléctricos	66
5.1. Descripción de la Adquisición de Datos	66
5.1.1. Instrumentación	67

5.2. Resultados de las Imágenes de Resistividad Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales	68
5.2.1. Interpretación de la Imagen Eléctrica obtenida con la Tomografía 1	68
5.2.2. Interpretación de la Imagen Eléctrica obtenida con la Tomografía 2	70
5.2.3. Interpretación de la Imagen Eléctrica obtenida con la Tomografía 3	72
5.2.4. Sondeos Eléctricos Verticales	74
5.2.4.1. Interpretación de la Curva de Resistividad Aparente obtenida con el SEV 1	74
5.2.4.2. Interpretación de la Curva de Resistividad Aparente obtenida con el SEV 2	76
Conclusiones	80
Anexos	81
Referencias	97

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos geoelectricos han sido usados ampliamente para la determinación de acuíferos subterráneos, sin embargo una de sus principales limitaciones como herramienta de exploración es que no genera una solución única, el apoyo de información adicional, información de pozos del área, le permiten a estos métodos restringir el número de soluciones.

El presente estudio, realizado en el área de Punta Banda, Baja California, tiene como objetivo la caracterización de zonas con potencial geotérmico por medio de métodos geoelectricos.

1.1. Trabajos Previos

Gastil (1975) realizó estudios geológicos y estructurales en la Península de Baja California, definiendo la Planicie Costera de Todos Santos como un semigraben relleno de sedimentos, el cuál es controlado por la falla de Agua Blanca como límite sur. Determinó también los límites del batolito de edad cretácica y la petrografía de las rocas batolíticas, así como el ambiente de emplazamiento, concluyendo que el batolito es producto de un vulcanismo andesítico y la petrografía está relacionada con la variación en la corteza preexistente.

Vázquez González y Fabriol (1982) realizaron estudios de gravimetría, resistividad y mediciones telúricas en el Valle de Maneadero, con los cuales se estimó la profundidad del basamento a lo largo de dos perfiles perpendiculares a la Falla Agua Blanca (entre 1700 m y 900 m) y reportaron un contraste de densidad entre sedimentos y andesitas de 0.7 g/cm^3 .

González Fernández et al. (2000) realizaron levantamientos geofísicos en la península de Punta Banda y la Barra El Estero, uno magnetométrico y otro gravimétrico. Este estudio define la existencia de al menos tres fallas secundarias del sistema de fallas Agua Blanca. Estas fallas secundarias son de

desplazamiento lateral derecho y controlan los accidentes topográficos mayores en la Península, resultando en una sucesión de valles y elevaciones subparalelas, alineadas en dirección NNW-SSE.

Pérez Flores et al. (2004) integraron datos gravimétricos y magnéticos tomados entre 1962 y 2000 para definir el marco estructural y el modelo tectónico de la Planicie Costera de Todos Santos, obteniendo como resultado un mapa topográfico del basamento.

Vidal et al. (1978) efectuaron estudios geoquímicos en Punta Banda para observar la actividad hidrotermal submarina, encontrando que este dinamismo ocurre cerca de la Falla Agua Blanca y que existe SiO_2 a gran cantidad debido a las altas temperaturas de las interacciones agua-roca a profundidad. La actividad submarina hidrotermal de Punta Banda se caracteriza por sus depósitos metalíferos.

Beltrán y Quintanilla (2001) con base en estudios de análisis geoquímicos presentaron datos de flujo de calor en la región de Ensenada, en donde encontraron que la actividad hidrotermal está asociada con los principales sistemas de fallas de la región.

Canet y Prol Ledesma (2006) realizaron estudios geoquímicos y mineralógicos para definir a los manantiales hidrotermales submarinos someros en las costas occidentales de México (Punta Banda y Bahía Concepción en Baja California, y Punta Mita en Nayarit).

Estos trabajos convergen en el hecho de que existe una importante actividad geotérmica en la zona controlada por los sistemas de fallas (Agua Blanca y sus fallas asociadas) con posibilidades de encontrar fuentes de agua termal a temperaturas superiores a los 100°C , sin embargo, estos estudios no dan una completa caracterización geoquímica de las aguas ni tampoco la ubicación de sus principales fuentes.

1.2. Localización del Área de Estudio

El Estero de Punta Banda se localiza en el noroeste del Estado de Baja California. Al suroeste de la Bahía de Todos Santos, y aproximadamente a 13 km al sur de la ciudad de Ensenada. Entre los 31° 42' - 31° 47' de latitud norte y los 116° 37' - 116° 40' de longitud oeste.

La Bahía de Todos Santos está constituida por una regresión de la costa que, forma la prolongada península de Punta Banda con dirección NE; se desvía al NE en una extensión aproximada de 11 km, para luego volver a recobrar su dirección NW. El estero de Punta Banda se encuentra rodeado prácticamente por el desarrollo urbano y agrícola, 3 km al norte se localiza el Ejido Chapultepec, parte del poblado de Maneadero y el aeropuerto militar. Al este se localiza la carretera Transpenínsula, la zona agrícola y ganadera. Al oeste y norte la zona turística y residencial, y el desarrollo urbano y espacios abiertos al sur. Numerosos campamentos turísticos se sitúan de forma irregular en el área. El Valle de Maneadero es una de las más importantes zonas agrícolas de la región. Actualmente existen 216 parcelas; el área utilizada para la agricultura es de 39.03 km² mientras que 27.63 km² son pastizales.



1. Ubicación de la zona de estudio en el país.

1.3. Clima

La península de Baja California presenta dos grandes regiones climáticas: la primera, al noroeste, con un clima mediterráneo, con temperaturas templadas la mayor parte del año y lluvias en invierno; es en esta región donde se asienta la mayoría de la población; y la segunda, en la parte oriental, con un clima extremoso semiárido y escasas lluvias durante todo el año. Las dos regiones están divididas por las sierras La Rumorosa, Juárez y San Pedro Mártir.

El clima en Punta Banda es mediterráneo por encontrarse dentro de la zona templada del hemisferio norte y bajo la influencia del anticiclón del Pacífico, registrándose la mayor temperatura durante los meses de agosto y la más baja en enero. En el verano, temperaturas máximas oscilan entre 20 y 30 °C, y las mínimas alrededor de 15 °C. En el invierno, se registran temperaturas máximas entre 15 y 25 °C, y mínimas alrededor de 5 °C.

En las costas del Golfo de California se presenta la menor incidencia de precipitación pluvial del país, con registros medios anuales cercanos a los 40 mm. La presencia de altitudes importantes, a lo largo de la cadena montañosa de la Sierra de Juárez y San Pedro Mártir, ocasionan climas templados y semifríos, ambos subhúmedos en las cimas y mesetas altas.

La precipitación promedio anual es de 266.5 mm; en un periodo comprendido entre 1984 y 1993 en la estación Ensenada y reportada por el INEGI en 1997; el período de lluvias, por lo regular se manifiesta en los meses de noviembre a febrero, ocurriendo un cambio radical en los índices de precipitación entre mayo y julio, en donde se reduce drásticamente.

La evaporación potencial media anual varía entre 1100 y 1580 mm; manifestándose los mayores índices de evaporación en los meses de mayo, junio, julio y agosto; en tanto que en los meses de diciembre y enero, se tienen los valores más bajos.

1.4. Hidrología

Baja California posee pocos recursos hídricos y la representación de sistemas hídricos continentales, tanto lacustres (lagos) como potamológicos (ríos, arroyos, manantiales, etc.) es limitada; a esto se suma una baja precipitación pluvial, que sólo ocurre en una pequeña porción del territorio estatal, estas lluvias se presentan en condiciones normales varían de 200 a 300 mm al año, mientras que en el resto del estado las precipitaciones disminuyen significativamente, hasta registrar 50 mm al año.

Por lo tanto, el volumen de agua disponible para el estado es de 3,250 millones de metros cúbicos Mm^3 anuales, distribuido en las corrientes epicontinentales (ríos y arroyos) y subterráneas que drenan el territorio estatal. De este volumen:

- 2,950 Mm^3 se concentran en el Valle de Mexicali, de los que:
- 1,850 Mm^3 provienen de aguas superficiales
- 1,100 Mm^3 de aguas subterráneas;
- 300 Mm^3 restantes provienen de los recursos acuíferos subterráneos localizados en el resto del Estado y de los almacenamientos existentes en las presas.

En el área de Punta Banda, el humedal es proveído a través de dos cuencas que le drenan sus excedentes: Arroyo San Carlos, el cuál drena un área de 815 km^2 con una longitud de 60 km y Arroyo Las Animas que drena un área de 980 km^2 y tiene una longitud de 58 km.

Existen canales de menor importancia provenientes de las parcelas agrícolas y que se unen al arroyo Las Animas para posteriormente juntarse con los canales de mareas en el sureste del estero.

Los arroyos fluyen sólo en temporada de lluvia (Noviembre-Marzo). El arroyo San Carlos descarga en la boca del humedal mientras que el arroyo la Grulla descarga en el sureste del estero. Aunque el arroyo San Carlos esta parcialmente canalizado, forma un delta en la desembocadura.

En particular el acuífero del Valle de Maneadero tiene un estrato saturado de espesor de 105 m. En la década de 1978-1988, los años de mayor precipitación fueron 78, 80 y 83 en los que la media en la precipitación fue de 504.2 mm. Para el resto del período la media fue de 233.5 mm.

Actualmente, 40 millones $m^3/año$ son extraídos aún cuando la recarga es de 19 millones $m^3/año$; esto significa que existe una sobreexplotación de cerca de 20 millones $m^3/año$.

Hidrología Superficial

La zona de estudio se ubica en la Región Hidrológica Número 1, Baja California Noroccidental (Ensenada) comprende corrientes de carácter internacional y se encuentran en ella los ríos Tijuana y Tecate, principalmente, que desembocan en el Océano Pacífico. Esta región se divide en tres cuencas:

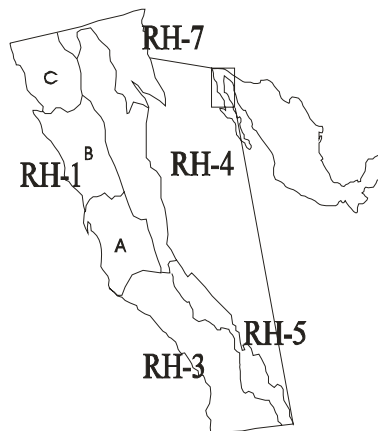


Figura 2. Regiones hidrológicas Baja California (Modificado INEGI, 2008).

- A. Arroyo Escopeta- Cañón de San Fernando. Tiene una superficie de $8,943.42 \text{ Km}^2$ y su límite sur lo marca el cañón de San Fernando. Tiene como subcuencas intermedias la del cañón de San Fernando, cañón de San Vicente, Arroyo El Rosario, Arroyo del Socorro, Arroyo San Simón y Arroyo de la Escopeta.

- B. Arroyo de las Animas-Arroyo Santo Domingo. Drena un área de $9,889.31 \text{ Km}^2$ y tiene como subcuencas la del Arroyo Santo Domingo, Río San Telmo, Río San Rafael, Arroyo Salado, Río San Vicente, Río Santo Tomás y Arroyo Las Animas.

C. Río Tijuana-Arroyo de Maneadero. Tiene una superficie de 7,905.73 Km^2 y está integrada por las subcuencas del arroyo de Maneadero, Ensenada, río Guadalupe, arroyo El Descanso, río Las Palmas y río Tijuana.

Hidrología subterránea

En la entidad no existen escurrimientos superficiales permanentes, lo cual repercute en las recargas que reciben los acuíferos. La red hidrográfica de Baja California es, en realidad, muy reducida, la evaporación elevada y las condiciones geológicas son adversas, pues la mayoría de las unidades de roca permiten que el agua fluya libremente debido a las elevadas pendientes, y sólo una mínima parte de esos escurrimientos llegan a los acuíferos. Por lo tanto, la distribución de los mantos acuíferos es heterogénea y se localiza en áreas relativamente pequeñas, a excepción del acuífero del Valle de Mexicali que presenta en algunos sitios problemas de sobreexplotación.

La conformación de los acuíferos en el estado de Baja California está definida principalmente por su topografía y litología que está compuesta por zonas abruptas, como por ejemplo las Sierras de Juárez, Libertad, entre otras, donde el clima es templado y subhúmedo que es diferente a otras cercanas las cuales son áridas y cálidas, lo que causa que el drenado tenga variaciones importantes. Es obvio que en las serranías el drenaje es mas abundante que en las zonas con planicies, esto debido a la infiltración o evaporación. Sólo algunos ríos logran desembocar al mar.

En estos lugares se encuentran materiales como clastos, rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que presentan baja permeabilidad, lo cual impide que se almacenen aguas en volúmenes que sean explotables.

En el estado existen 23 zonas de explotación de acuíferos, de los cuales: nueve están en equilibrio, doce son sobreexplotadas, y sólo dos están subexplotadas.

CAPITULO 2. MARCO GEOLÓGICO

2.1. FISIOGRAFÍA

En el estado de Baja California hay dos provincias fisiográficas que son: la Península de Baja California a la que pertenece la mayor parte de la entidad, y La Llanura Sonorense que penetra al noreste del estado, abarcando algunos terrenos costeros y deltáicos, entre los que destaca el Valle de Mexicali en sus porciones nororiental y oriental.

2.1.1. Provincia de la Península de Baja California

La provincia se caracteriza por su complejidad litológica y estructural, y por la predominancia en los núcleos serranos de rocas intrusivas batolíticas que afloran sobre todo en el norte de la entidad.

Esta provincia está caracterizada estructuralmente por una gran diversidad de estructuras geológicas entre las que destacan fallas normales, fracturas de diferentes dimensiones, derrames volcánicos y grandes cuerpos intrusivos. También existen pliegues en rocas sedimentarias (anticlinales y sinclinales) que son el producto de la deformación plástica de las mismas (INEGI, 2008).

El rasgo estructural más significativo lo constituye, sin duda, el sistema de fallas que conforma el límite oriental de la sierra con las llanuras del desierto sonorense que han producido los abruptos escarpes orientales de La Rumorosa, Juárez y San Pedro Mártir.

- *Subprovincia de las Sierras de Baja California*

Esta subprovincia es la mayor de las tres que constituyen la provincia de la Península de Baja California; corresponde casi al 80% del área total del estado. A partir de la frontera con los Estados Unidos y hacia el sur, las unidades orográficas de la cordillera son las sierras de Juárez y de San Pedro Mártir. Viendo al Pacífico, en torno a la bahía Rosario y hacia el norte, se encuentran las pocas sedimentarias de la subprovincia (areniscas, calizas y otras).

- *Subprovincia de la Sierra de la Giganta*

Sólo una pequeña parte de esta subprovincia penetra en el sureste del estado, y ocupa una porción del municipio de Ensenada. Tiene sus inicios al norte del paralelo 28, donde termina la sierra La Libertad. Sus altitudes disminuyen gradualmente hacia el sur hasta que en las cercanías de la región del Cabo llegan a ser simples lomeríos. El hecho de que esta sierra, al igual que las del norte, muestre un costado abrupto al oriente con acantilados sobre el Golfo que tiende suavemente hacia el occidente, y las rocas batolíticas que aparecen en la región del Cabo, apoyan la idea de que las rocas de la sierra de La Giganta, predominantemente volcánicas, reposan sobre un sepultado bloque de batolito.

Las rocas de tipo basáltico dominan en el norte, donde la morfología general es de meseta con cañadas; las del tipo piroclástico prevalecen en el sur, asociadas con paisaje de llanura con meseta.

- *Discontinuidad fisiográfica del Desierto de San Sebastián Vizcaíno*

El Desierto del Vizcaíno, predominantemente arenoso, presenta una superficie ondulada con pocas colinas bajas. Las dunas son de tipo semilunar y están orientadas noroeste-sureste, algunas son bastante activas en el norte, donde tienden a disponerse en franjas paralelas con esa orientación. Carece de un sistema de drenaje organizado ya que los arroyos que bajan desde el oriente se extinguen a poca distancia de la sierra. En el desierto, presenta un rasgo singular: abundante rocío en ciertos meses del año.

La llanura queda interrumpida en el oeste por la sierra de Vizcaíno y en el sur por la de Santa Clara. La primera, cuya extensión al norte es la isla Cedros, es baja, escarpada y discontinua, con rocas sedimentarias de varios tipos y rocas metamórficas. La segunda, de contorno toscamente circular y laderas tendidas, es de carácter volcánico donde predominan los basaltos. La línea de costa de la discontinuidad invariablemente presenta terrazas marinas.

2.1.2. Provincia de La Llanura Sonorense

La mayor parte del área de esta región en el estado, predominantemente llana, se encuentra saturada por varios tipos de depósitos cuaternarios. En el resto de las sierras, lomeríos y algunas mesetas afloran diversos tipos de rocas metamórficas e ígneas intrusivas ácidas (granito, granodiorita).

Además de los cuerpos intrusivos que forman parte del batolito Mesozoico de la península, las principales estructuras geológicas de esta provincia en la entidad, son las fallas y las fracturas profundas del sistema de la falla de San Andrés, que asociadas al aparato volcánico de Cerro Prieto, han sido causa de las manifestaciones geotérmicas en la localidad del mismo nombre.

- *Subprovincia del Desierto de Altar*

Es un desierto arenoso casi en su totalidad, en el que se han registrado históricamente las precipitaciones más bajas de todo el país; en su parte occidental presenta rasgos diferentes, como son las sierras escarpadas de Cucapás y el Mayor, ambas con cumbres que sobrepasan los 1000 m y están orientadas al nornoroeste-sursureste; y la llanura de la Laguna Salada, que en su porción norte presenta superficies inferiores al nivel del mar.

En esta subprovincia, se encuentra el mayor delta del país -el del río Colorado- que se extiende desde la frontera con los Estados Unidos, donde tiene un ancho aproximado a los 90 km, hasta el Golfo de California. Los campos de dunas interrumpidos únicamente al oriente del delta y al norte de la Bahía de San Jorge por lomeríos de rocas metamórficas del Precámbrico, se extienden sobre casi todo el resto de la subprovincia. Estas dunas son semilunares, con la ladera abrupta y los cuernos a sotavento de los vientos dominantes. Todas las llanuras del Desierto de Altar están por abajo de los 200 m de altura.



Fig. 3. Provincias fisiográficas del Estado de Baja California Norte (Modificado de INEGI, 2008)

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL

Baja California forma la península de mayor tamaño en la costa del Pacífico. Se extiende por más de 1,000 km de norte a sur paralela con el continente, del cuál está separada por el hundimiento en forma de fosa del Golfo de California.

El origen geológico de la península de la Baja California se remonta hasta la era Paleozoica. En épocas anteriores estuvo cubierta por aguas de mares ya desaparecidos. En el Cretácico la cordillera peninsular moldeó su fisonomía, mediante su separación física del macizo continental, que a su vez provocó el hundimiento de territorios que formaron el golfo de California.

La entidad está constituida litológicamente por una gran variedad de rocas de los tres tipos: ígneas, sedimentarias y metamórficas, cuyas edades abarcan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

El estado de Baja California, se encuentra recorrido en el sentido de su eje mayor, por una serie de sierras que en conjunto constituyen la Cordillera Peninsular y que están formadas básicamente por un núcleo granítico de gran tamaño formado en el interior de la corteza terrestre, aflora en el Norte y se oculta en el Sur bajo materiales volcánicos.

Tiene la forma de un bloque alargado e inclinado hacia el Sureste; presenta un flanco abrupto hacia el Golfo de California, otro más suave hacia el Océano Pacífico, lo que determina la configuración alargada y angosta de la península. Esto ha dado lugar a la formación de una gran variedad de topofomas, tales como valles, llanuras, sierras, etc. (López Ramos, 1985).

La provincia de Baja California tiene una anchura media de 80 km, limitada al Norte por las Cordilleras Transversales del Sur de California, hacia el oriente por las depresiones de Saltón y las de San Felipe-Tiburón, que yacen en el Golfo de California, hacia el Noroeste por la provincia "Continental Borderland"; al Oeste por los restos de la región metamórfica de la Isla Cedros-Sierra San Andrés y por el Océano Pacífico y hacia el Suroeste por la Provincia de Sierras en la Plataforma Marina de Baja California (López Ramos, 1985).

Este complejo ha sido dividido en seis subprovincias:

1. Mexicali. Ocupa el delta del Río Colorado con un afloramiento de rocas metamórficas en el centro.
2. Sierra de Juárez. Consiste en un área granítica montañosa, un batolito asimétrico fallado al oriente y levantado a favor de esa falla, por lo que su flanco occidental es más extenso y más suavemente inclinado que el oriental.
3. San Sebastián Vizcaíno. Forma la porción central y de la Península del mismo nombre, aquí afloran rocas desde el Triásico al Neógeno.
4. Sierra de la Giganta. Cubre la región centro-oriental del Estado. Constituye una gran masa de rocas volcánicas de edad del Mioceno al Plioceno con pocas rocas intrusitas.

5. Cuenca Purísima Iray. Formada por sedimentos del Paleoceno al Plioceno, con grandes depósitos de fosforitas.
6. Sierra de la Victoria. Constituye el extremo sur de la Península. Consta de rocas cristalinas y metamórficas representadas por una asociación de gneis, esquistos, granitos y tonalitas.

2.3. GEOLOGÍA HISTÓRICA

La configuración geográfica de México es consecuencia de la interacción del bloque continental con las provincias oceánicas que lo circundan. La Península de Baja California se está separando del resto del continente con un movimiento hacia el noroeste. Se tienen esfuerzos tectónicos de separación cortical, que actúan en los márgenes continentales, los cuales avanzan sobre los fondos profundos de las cuencas oceánicas como consecuencia del desplazamiento de la placa tectónica continental de Norteamérica hacia el poniente.

La placa continental de Norteamérica, en el transcurso de su migración hacia el norte y occidente, asimiló progresivamente a la placa oceánica de Farallón, lo que dio como consecuencia que el arco magmático desarrollado en el Jurásico Superior migrara hacia el noreste en el interior del continente.

Las rocas más viejas que pueden ser reconocidas en la provincia Peninsular son del Paleozoico expuestas en la Sierra Pinta. (al sur de Mexicali), una unidad de calizas sobrepuestas en una secuencia de rocas metamórficas de bajo grado de edad Pre-Carbonífera. En el Paleozoico Superior dio origen a un conjunto de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con diversos grados de metamorfismo.

En el Periodo Jurásico se formaron miles de metros de estratos volcánico-volcanoclásticos acumulados en el sistema de arco de isla que continuó a consumir la placa oceánica y generar magmas de composición granodiorita, grabo y tonalita sobre los siguientes 60 millones de años (Aguayo, 1996).

En el Cretácico Tardío la actividad volcánica inició un periodo de quietud a lo largo de la costa oeste que perduró hasta el Eoceno Superior. Cuencas y cordilleras comienzan a formarse y los ríos que tienen drenaje hacia el Pacífico son renovados en otras direcciones.

Durante el Mioceno Medio el margen continental de la placa de Norteamérica traslapó a la dorsal oceánica del Pacífico, y dio origen a un sistema estructural complejo con dos juntas triples de fracturas y fallas geológicas, que facilitaron el desplazamiento del margen norte-occidental de México. Este traslape se manifestó en el continente como un sistema de fosas y pilares alargados y paralelos al margen occidental de México. La Península de Baja California fue afectada por las fallas de transcurrencia con movimiento lateral del sistema San Andrés, que son la proyección en superficie de las fallas de transformación de la dorsal oceánica asimilada por el continente Norte fue una serie de cordilleras y cuencas de mitad del Mioceno. Granitos y rocas metamórficas son expuestas en el este; la andesita y el basalto son lanzados del oeste (Aguayo, 1996).

Durante el Mioceno Tardío y el Plioceno Temprano, el extremo sur-oriental de la actual Península de Baja California se empezó a separar del resto del continente, y las aguas del Océano Pacífico penetraron por esta abertura, formándose el protogolfo de California.

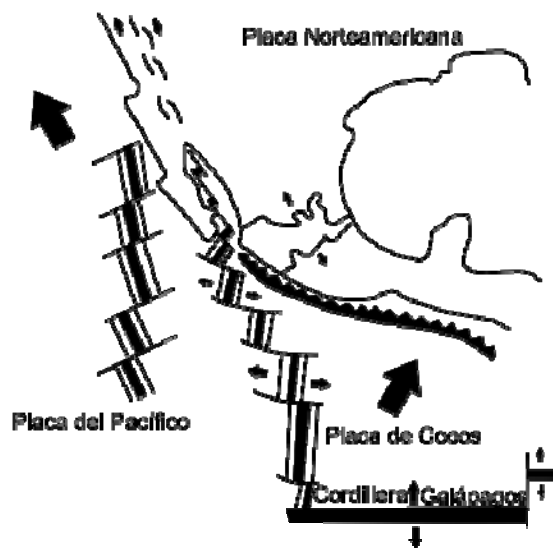


Fig. 4. Separación de la Península de Baja California durante el Mioceno (Modificado de Aguayo, 1996)

A partir del Plioceno el margen continental se siguió desplazando hacia el noroeste hasta separarse casi totalmente del resto de México, y dio como resultado la actual Península de Baja California y su mar interior. El rompimiento y el desplazamiento de la península se debieron al movimiento de la placa de Norteamérica hacia el occidente. En el fondo centro-meridional del golfo afloran rocas ígneas de composición de corteza oceánica típica.

2.4. ESTRATIGRAFÍA

En Baja California, afloran secuencias de formaciones de rocas cuyas edades van desde el Paleozoico hasta el reciente, se diferencian por tres cinturones Cretácicos Preterciarios definidos de acuerdo a sus características litoestratigráficas, expuestos a lo largo de la porción norte de la Península de Baja California, presenta características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciadas.

En la porción occidental de Baja California el Primer Cinturón está constituido por una secuencia de depósitos sedimentarios de origen marino y continental de edad Cretácico Superior, se presentan poco consolidados con sensibles perturbaciones tectónicas. Esta secuencia sedimentaria fue denominada como Formación Rosario constituida por estratos subhorizontales de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados desarrollados en un ambiente mixto, varían desde continentales hasta de plataforma y talud, con línea de costa fluctuante.

Al este del cinturón anteriormente descrito, se ubica el Segundo Cinturón, constituido por rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias de edad Cretácico Inferior. Esta secuencia superior es más extensa y es denominada como Formación Alisitos, de constitución piroclástica y lávica de composición dacítico-andesítica, además de cuerpos masivos de caliza arrecifal y rocas clásticas de origen volcánico.

La Formación Alisitos cubre en algunas localidades discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad Triásico y Jurásico; se encuentran afalladas, deformadas, parcialmente metamorfoseadas y afectadas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos de naturaleza ácida del Cretácico, subyace discordantemente al Grupo Rosario.

El *Tercer Cinturón* se localiza en la porción norte de la Península de Baja California, integrado por rocas ígneas intrusivas de tonalita a granodiorita y granito, forman parte de los batolitos Mesozoicos y rocas metamórficas de origen sedimentario con metamorfismo regional, presenta diversas facies.

El Cenozoico se caracterizó por la acumulación de gruesos espesores de depósitos sedimentarios continentales, por el desarrollo de sedimentos marinos en el borde occidental de la Península y una importante actividad volcánica que cubrió una porción de los cinturones Mesozoicos anteriores.

Durante el Paleoceno y Eoceno, se acumularon depósitos sedimentarios de ambiente cercano a la influencia de la costa; estos depósitos tuvieron su origen en las porciones orientales emergidas.

Los sedimentos fluviales y eólicos que se encuentran expuestos a la altura del Paralelo 31º, se observan coronando las emisiones lávicas del Plioceno y Mioceno; al sur del estado se acumularon depósitos fluviales, aluviales, eólicos y lacustres.

2.5. GEOMORFOLOGÍA

En Baja California hay seis provincias geomorfológicas definidas: La Costa Pacífica, la Sierra Costera, la Meseta Alta Norteña, el Valle Alto, la Meseta Alta Sureña y el Golfo de California. Ensenada forma parte de la Provincia de la Costa Pacífica y se incluye dentro del Bloque de Santo Tomás y la Planicie Costera de Todos Santos. Ahí se distinguen los siguientes bloques:

- *Planicie Costera de Todos Santos*

La Planicie Costera de Todos Santos es una zona de que incluye la ciudad de Ensenada, Valle de Maneadero y la Bahía de Todos Santos, es una extensión de aproximadamente 150 km^2 que forma un semigraben con la falla de Agua Blanca formada al Suroeste del límite, este semigraben está relleno de 2000 m de sedimentos cuya edad es desconocida (Gastil et al., 1975).

- *Bloque de Ensenada*

El terreno del bloque de Ensenada es muy accidentado, se extiende hasta el valle de Guadalupe, al sur de la falla de Agua Blanca, al este una serie de picos altos marca el límite oriental de este bloque. Los depósitos remanentes son de conglomerado fluvial, que se encuentran dispersos por sobre la meseta alta a 400 m en la esquina Noroeste del bloque (Gastil et al., 1975).

- *Bloque de Santo Tomás*

Al sur de Ensenada, aflora una superficie de roca con un altura de 100 [m] más que el bloque de rocas adyacentes, esto es a causa de la dispersión de la Falla Agua Blanca. La secuencia del bloque de Santo Tomás está constituido por las montañas localizadas en la costa, al Sur de la falla de Agua Blanca (Gastil et al., 1975).

2.6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La península de Baja California forma parte de la placa Pacífico, la cual se desplaza hacia el NW con respecto a la placa Norteamericana. Entre las estructuras principales de la zona de estudio se encuentran la línea de Santillán y Barrera localizada al sur de la Falla de Agua Blanca.

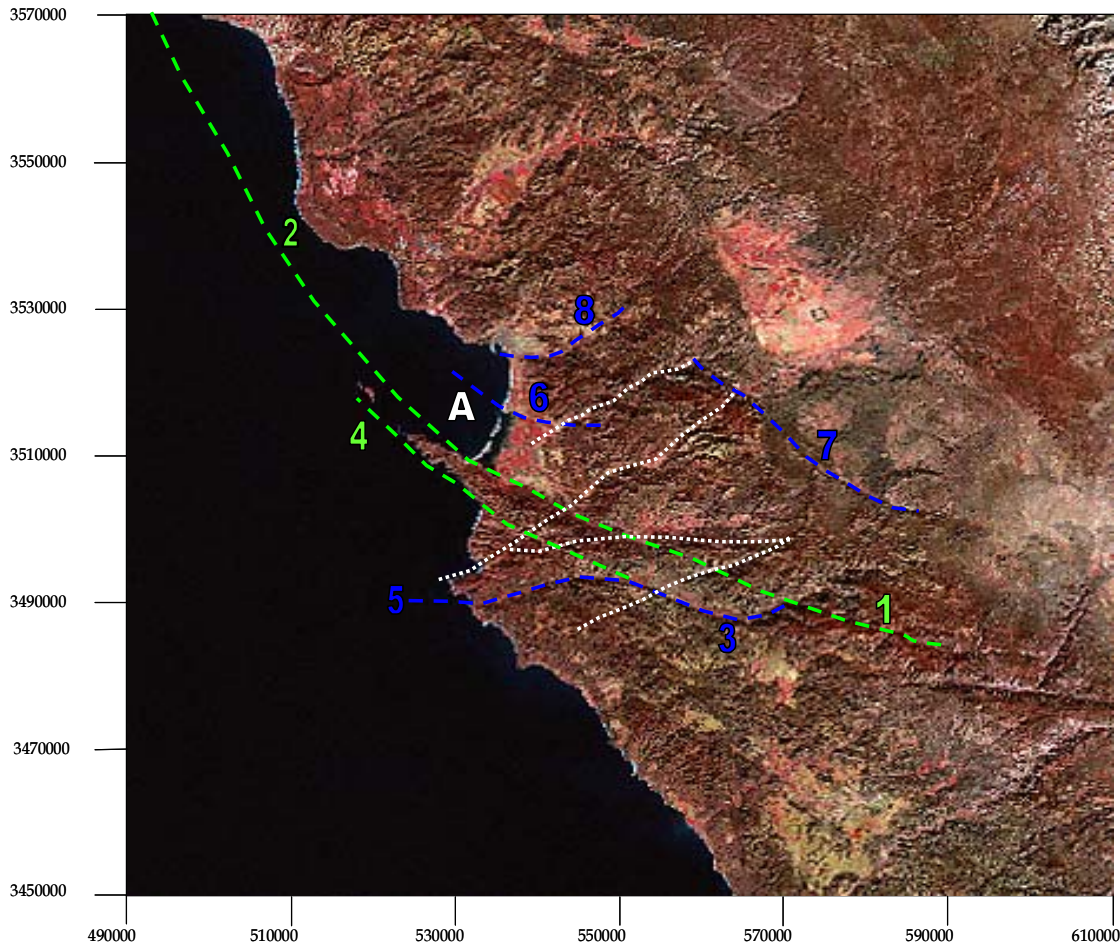


Fig. 5. Principales Fallas del área de Estudio (Modificado de Cruz-Castillo, 2002). Las Falla en color verde son las descritas en esta sección, las blancas aún no están definidas. A = Bahía Todos Santos, 1 = Falla Agua Blanca, 2 = Sistema Coronado Bank-Agua Blanca, 3 = Falla Santo Tomás, 4 = Falla Maximinos, 5 = Falla Soledad, 6 = Falla El Descanso-Estero, 7 = Falla Tres Hermanos, 8 = Falla Ensenada.

- *Sistema El Descanso-Estero*

Se encuentra localizada entre Punta Salsipuedes y la ciudad de Ensenada. La falla El Descanso-Estero continúa a lo largo del tramo SW del escarpe meridional de la ciudad de Ensenada. Su extensión hacia la Bahía de Ensenada no es clara y consiste de discontinuidades subparalelas en tramos cortos, menores a 10 km. Se infiere que es de tipo lateral derecho.

- *Sistema Coronado Bank-Agua Blanca*

La zona de falla Coronado Bank-Agua Blanca (Fig. 5.) es la más compleja de las fallas del Borde Continental, presenta numerosas discontinuidades subparalelas. La falla Coronado Bank se une con la falla Agua Blanca en la bahía de Ensenada. Ambas fallas tienen una orientación N30°W en la zona marina y de N70°W dentro de la península. Este cambio en la orientación de las fallas es la diferencia principal entre las estructuras del Borde Continental y las Peninsulares.

- *Falla Agua Blanca*

Esta falla se extiende desde El Paso de San Matías hasta la Bahía de Todos Santos, con un rumbo de N72°W; tiene como mínimo 22 km de desplazamiento lateral y es la falla activa más antigua del norte de Baja California; existe desde el Mesozoico tardío. En el Valle de Santo Tomás se divide en dos brazos que limitan el sur y el norte de la Península de Punta Banda; el brazo sur es conocido como falla Santo Tomás y se ramifica en la falla conocida como Soledad y en la falla Maximinos (Fig. 5).

La tendencia general de este sistema de fallas es un sistema de fallas laterales que se dividen en bloques estructurales. Existen tres fallas secundarias que acomodan la deformación entre las dos ramas del sistema de fallas Agua Blanca. Estas fallas secundarias son de desplazamiento lateral derecho y controlan los accidentes topográficos mayores en la Península, resultando una sucesión de valles y elevaciones subparalelas, alineadas en dirección NNW-SSE.

La falla Agua Blanca tiene una longitud expuesta de 130 km formando sierras, corta y desplaza abanicos aluviales, forma cañadas, cañones, valles en escalón, cuencas de forma triangular y en la Península de Punta Banda se pueden apreciar sus facetas triangulares.

- *Falla Maximinos*

Esta falla lateral derecha, con componente normal, es subsidiaria de la falla Agua Blanca debido a su paralelismo y cercanía. Se localiza al sur de la península Punta Banda.

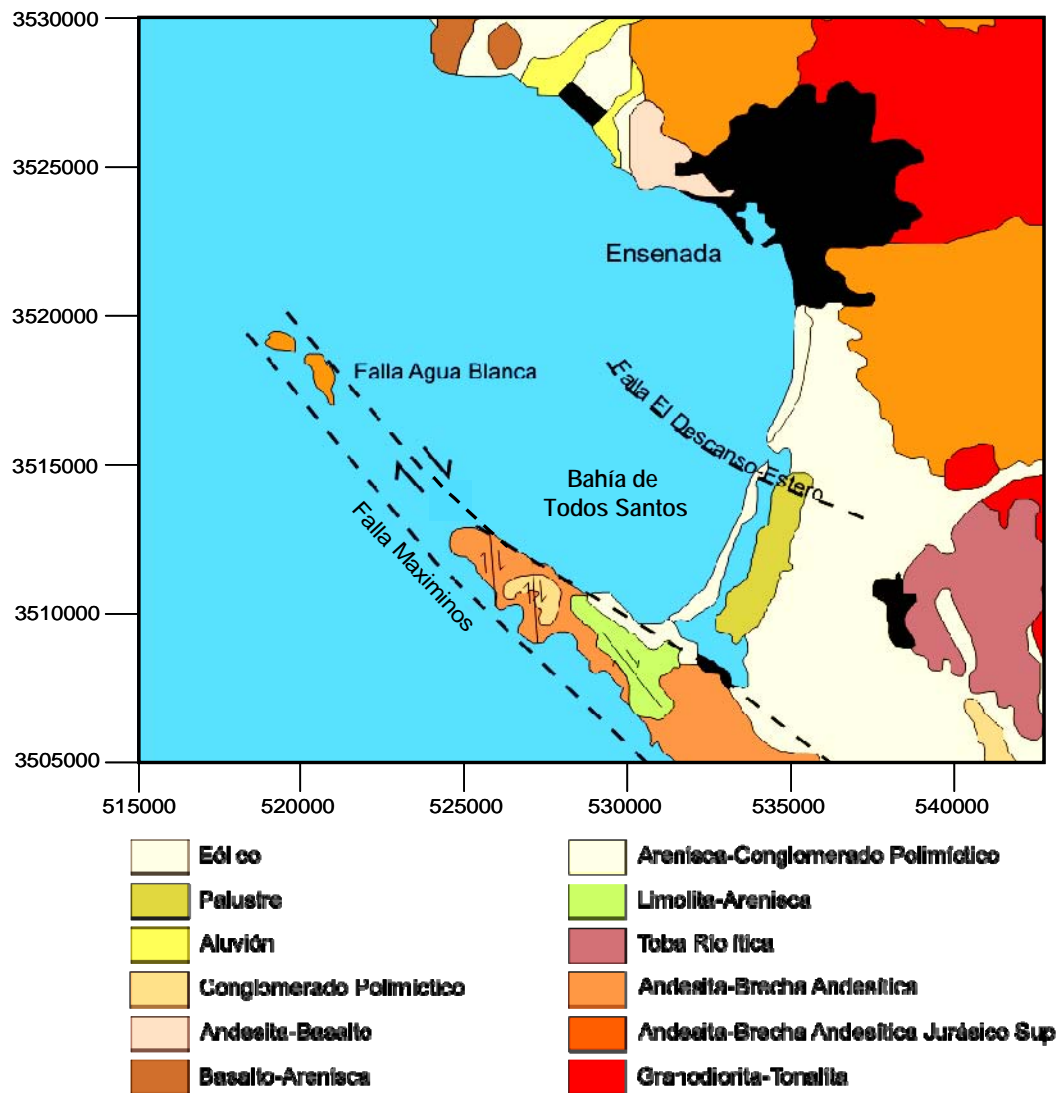


Fig. 6. Geología de Punta Banda (Modificado de Carta Geológico-Minera H11-2, Pérez-Flores et. al., 2004)

GEOLOGÍA LOCAL

La región de estudio está formada por un cordón montañoso que representa un horst cuyos flancos están controlados por fallas de desplazamiento lateral derecho y que componen el sistema de fallas Agua Blanca (Gastil et al., 1975).

Se clasifican por su posición relativa, en rocas pre batolíticas y post-batolíticas. Las rocas pre-batolíticas comprenden rocas paleozoicas, mesozoicas sedimentarias y volcanoclásticas metamorizadas.

Las rocas batolíticas comprenden aquí rocas ígneas intrusivas de composición granítica y cuarzodiorítica que se emplazaron en el Cretácico tardío. Las rocas post-batolíticas incluyen rocas del Cretácico tardío, del Neógeno y del cuaternario. Estas rocas son sedimentarias clásticas y volcánicas (INEGI, 1984).

2.6.1. Formación Alisitos

Las rocas pre-batolíticas de origen volcánico del Mesozoico, están constituidas por brechas dacíticas andesíticas, esquistos y corneas no diferenciadas. Se localizan en la zona denominada como Península de Punta Banda, las cuales corresponden a la Formación Alisitos, además las rocas pre-batolíticas, integradas como volcánicas y metavolcánicas, afloran en la porción este y norte del área.

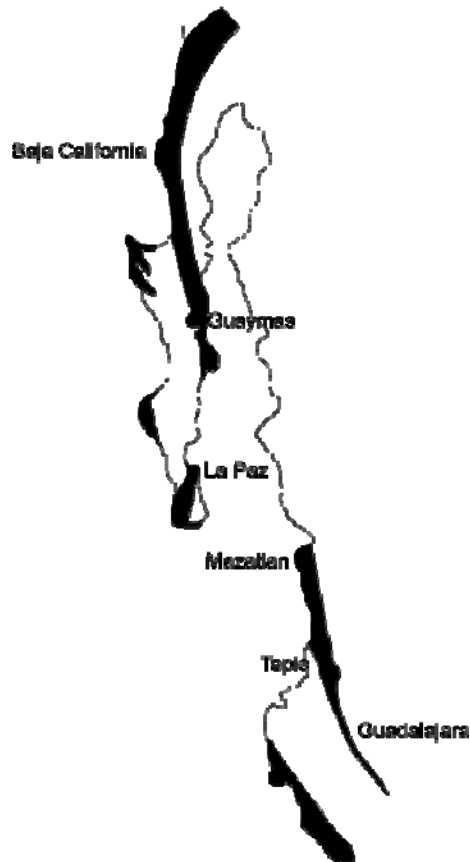


Fig. 7. Franja Batolítica del Cretácico

La Formación Alisitos se trata de una secuencia vulcano-sedimentaria con facies metamórficas de bajo grado de edad Aptiano-Albiano representadas por rocas metasedimentarias, constituida por esquisto, filita, pizarra, arenisca, lutita y caliza; sobreyaciendo concordantemente afloran rocas metavolcánicas, representadas por metaandesita, metadacita, metariodacita y metatraquiandesita; de igual forma están expuestas rocas volcánicas, representadas por andesita y brecha andesítica, intercaladas con paquetes de caliza fosilífera y toba riolítica-toba riodacítica (carta Geológico-Minera H11-2, SGM).

Las rocas batolíticas, básicamente corresponden a rocas graníticas de edad Cretácico, constituidas principalmente por tonalitas, gabros y granodioritas, expuestas principalmente al este del área, por su origen intrusivo afectan a rocas plutónicas y metamórficas mezcladas, gneis, pizarras, metasedimentarias y volcánicas no diferenciadas, expuestas al este de la cuenca.

2.6.2. Formación Rosario

Las rocas sedimentarias del Grupo Rosario, agrupadas como rocas post-batolíticas sobreyacen a la Formación Alisitos (Gastil, 1975), afloran en la Península de Punta Banda y al Suroeste del Valle de Maneadero. El Grupo Rosario, consiste de una secuencia de clastos sedimentarios que gradúan de conglomerados a lutitas, con una inclinación de 55° atribuida al movimiento provocado por la acción de la Falla de Agua Blanca. Cubriendo este grupo, se encuentran las terrazas marinas del Pleistoceno.

2.6.3. Formación Rosarito Beach

Sobre la “Formación Rosario” se encuentra en forma discordante la “Formación Rosarito Beach”, compuesta por una gruesa sucesión de sedimentos fosilíferos, un abundante contenido de horizontes tobáceos, y flujos basálticos, todos ellos del Mioceno. Un miembro sedimentario intermedio de la “Formación Rosarito Beach” está formado por tobas, areniscas feldespáticas tobáceas, diatomitas y brechas arenosas con espesores entre 5 y 18 m. Los restos de fauna de camélidos, radiolarios y foraminíferos indican una edad Mioceno medio. La unidad fosilífera localizada en la parte sureste de la zona “La Misión” se encuentra cubierta por un delgado flujo de basalto. Sobre la “Formación Rosarito Beach” se encuentra en forma discordante una serie de depósitos fundamentalmente arenosos poco compactados, con estratificación cruzada y subhorizontal y con intercalaciones de gravas.

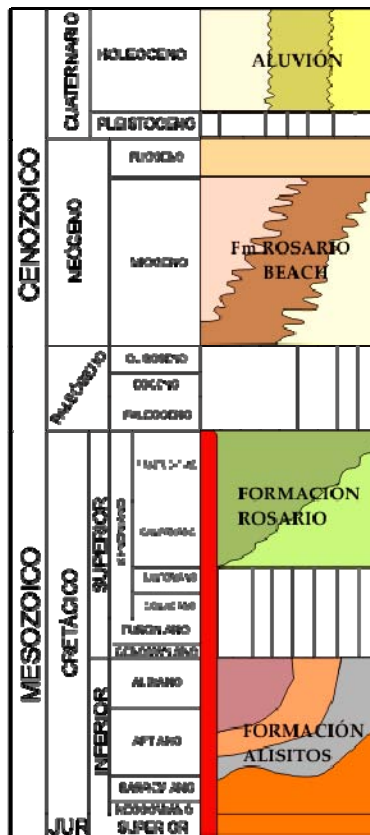


Fig. 8. Columna Geológica de la zona de Ensenada (Modificado de Carta Geológico-Minera H11-2)

La región de Punta Banda se incluye geomorfológicamente en la Planicie Costera de Todos Santos rodeada de fallas activas de desplazamiento lateral derecho y que componen el sistema de fallas Agua Blanca.

Se clasifican por su posición relativa, en rocas pre-batolíticas, batolíticas y post-batolíticas. Las Formación Alisitos, constituida principalmente por brechas dacíticas y andesíticas, esquistos pertenecientes a rocas pre-batolíticas; y las rocas batolíticas son mayormente tonalitas, gabros y granodioritas. La Formación Rosario se constituye principalmente de rocas post-batolíticas: clastos sedimentarios y lutitas, mientras que la Formación Rosarito Beach está compuesta por tobas, areniscas y brechas arenosas.

CAPITULO 3. GEOQUÍMICA

La presencia de manantiales geotermales en el área de Ensenada se conoce desde la década de los ochenta. Como se mencionó en el capítulo anterior, la región de Punta Banda se encuentra tectónicamente afectada por varias fallas regionales activas. La falla paleotransforme de Agua Blanca es considerada como una falla activa y es el sistema principal de la región de Ensenada (Gastil et al., 1979).

La energía geotérmica submarina surge de rupturas profundas en el fondo marino, a lo largo de los centros de dispersión oceánicas entre las placas tectónicas. Existen dos tipos básicos de sistemas marinos en Baja California: los recursos profundos, localizados a lo largo de las cordilleras entre las placas de la corteza oceánica a más de 2000 m bajo el nivel del mar y los recursos poco profundos cercanos a las plataformas continentales, entre 20 y 50 m de profundidad. El calor submarino poco profundo también se relaciona con fallas y fracturas en el fondo del mar cerca de algunas costas.

Beltrán Abaunza y colaboradores (2001) realizaron un estudio geoquímico térmico para la región de Ensenada, con datos de agua de 62 pozos, obteniendo al cloruro como anión dominante en el 85% de los pozos y manantiales estudiados, seguido por el ión bicarbonato en el 15% de ellos. Las concentraciones de cloruro en las muestras de agua indican que en el área están sucediendo procesos de dilución y mezcla entre los distintos tipos de agua. Esta agua fue clasificada como agua con cloruro y carbonato diluidos y este tipo de fluido generalmente se encuentra en sistemas de manantiales de baja temperatura.

En el área de Punta Banda existe un sistema hidrotermal que se manifiesta en dos zonas de emisión hidrotermal submarina y un manantial hidrotermal subaéreo (Canet y Prol Ledesma, 2006).

En la Península de Punta Banda existen manantiales geotermales subaéreos, intramareales y submarinos. La química del agua muestra que las manifestaciones de tipo NaCl y NaClSO₄ son depositaciones de sílice y sulfatos. La temperatura de algunos pozos es superior a los 70°C, que es reconocida como una temperatura de manantiales intramareales (Fig. 9).

Metodología

Prol Ledesma et al. (2008) colectaron muestras de agua en dos épocas, Enero y Octubre del 2007, que fueron almacenadas en botellas de Nalgene. Para el análisis de trazas y tierras raras se utilizó una muestra acidificada con HNO₃ concentrado. Otras dos muestras fueron utilizadas para determinar los aniones con HPLC (Cromatografía Líquida de Alta Resolución) y concentraciones isotópicas de H y O.

Las mediciones en campo (pH, Conductividad Eléctrica, Total de Sólidos Disueltos TDS y salinidad) se realizaron con un Multiparámetro Hach Portátil SenION156. La calibración de pH se realizó con soluciones de pH 4, 7 y 10, y la conductividad con una solución de norma 1000 µS/cm. Se utilizaron los métodos Volumétrico para determinar HCO₃, el método turbidítico con cloruro de bario para analizar los sulfatos, el método del metileno azul para determinar los sulfuros. El amoníaco se determinó utilizando el método Nessler (EDL=0,06mg/L); Sílice fue analizado por Método Heteropoly Azul. Los principales iones se analizaron en el laboratorio de cromatografía del Instituto de Geofísica (UNAM): Na⁺ (Límite de Detección del Método MDL=0,56 mg/L), K⁺ (MDL=0,84 mg/L), Li⁺ (MDL=0,48 mg/L), Mg²⁺ (MDL=0,22 mg/L), Ca²⁺ (MDL=0,33 mg/L), NH⁴⁺ (MDL=0,08 mg/L), Cl⁻ (MDL=0,55 mg/L), F⁻ (MDL=0,09 mg/L), Br⁻ (MDL=0,07 mg/L), NO²⁻ (MDL=0,15 mg/L), y NO³⁻ (MDL=0,69 mg/L) y SO₄²⁻ (MDL=1,45 mg/L).

En la zona de Ensenada se recolectaron catorce muestras (Fig.10) en las manifestaciones geotérmicas: tres muestras son aguas termales en el Ejido Uruapan (Urpn), San Carlos (SnC) y las Pocitas (LPc); seis de las muestras

son manifestaciones intramaerales en La Joya (JII) y Agua Caliente (AgCIn); dos muestras de pozos calientes en La Joya con una profundidad de 15 m, una muestra es de ventilas submarinas en el área de La Bufadora (V.Buf.), y dos muestras de referencia son de agua de mar, una se recogió en la zona de La Bufadora (Blc V) localizada en las ventilas submarinas y la otra en la zona de Estero (Blc) lejos de la influencia de las ventilas submarinas.

Parámetros determinados en campo						Composición Química			
Muestra	Temp [°C]	pH	Cond [mS/cm]	Sal [ppmi l]	TDS [ppm]	Cl ⁻ [ppm]	HCO ³⁻ [ppm]	SO ₄ ²⁻ [ppm]	SiO ₂ [ppm]
JII-1	50	7.29	26000	14.9	15100	7772	223	1187.5	57.1
JII-2	55	6.88	25000	14.8	15000	15276	242	1125	64.4
JII-3	74	6.26	11810	6.9	6540	3696	74	260	41.5
JII-4 *	73	5.43	11860	7.4	6550	3489	186	287.5	39.68
JII-5	29	6.56	30900	19.3	17650	9665	233	1600	49.92
AgCIn 1*	62	7.01	16570	9.3	9530	4873	242	1175	77.7
AgCIn-2	53	6.75	21600	14.4	12510	7928	186	1000	104.6
AgCIn-3	47	6.65	18660	12.2	10660	6693	233	750	90.4
V.Buf.	N.D.	7.28	32300	20.3	19420	11087	959	186	81.5
Blc.	N.D.	8.09	45800	29.9	28420				
Blc. V.	N.D.	8.04	45500	26.6	28300				
Urpn	42	8.83	972	0.5	477				
SnC	49	8.37	595	0.3	287				
LPc	42	9.57	543	0.3	264				

Tabla1. Parámetros determinados en campo y composición química de la zona Punta Banda, estudio realizado por Impulsa. *Parámetros determinados fuera del área de Punta Banda.

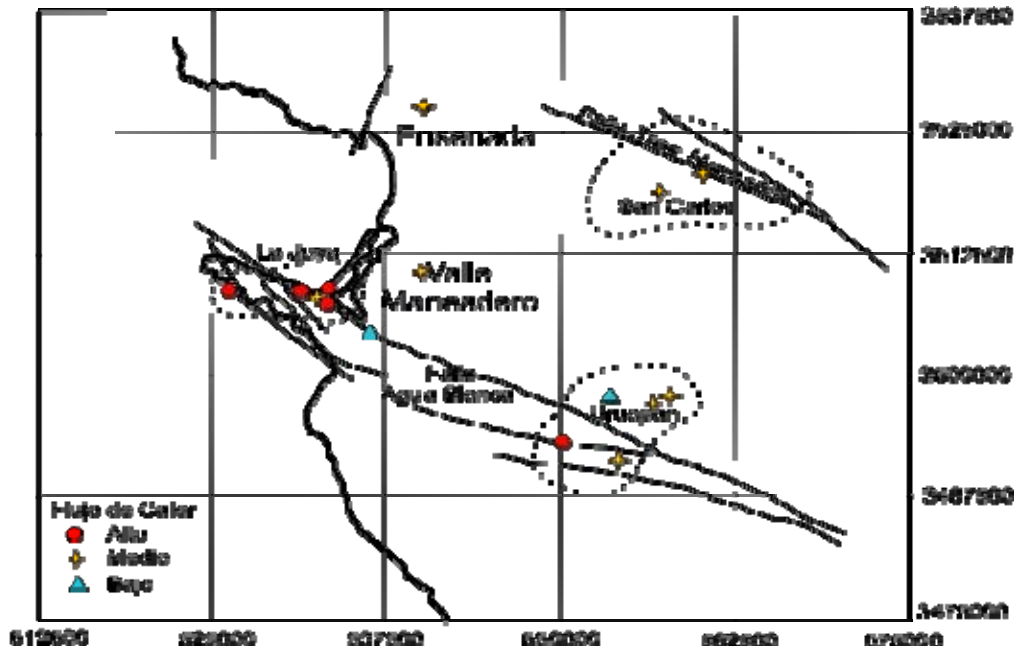


Fig. 9. Zonas termales de área de Ensenada (Beltrán y Quintanilla, 2001).

De acuerdo al estudio llevado a cabo por Vidal et al. (1978), existe un suministro suficiente de SiO_2 y este enriquecimiento puede ser seguramente atribuido a la alta temperatura de las interacciones agua-roca a profundidad con respecto al cuarzo. También encontraron que el tiempo de residencia de algunos manantiales es lo suficientemente largo para suministrar la existencia de un equilibrio de fluidos en el yacimiento mineral.

El enriquecimiento con SiO_2 en las muestras de agua puede deberse a dos mecanismos:

1. La evolución del agua hidrotermal en depósitos o estratos marinos. Este se explica por la presencia de las formaciones de sedimentos marinos localizados en la zona de Ensenada-Punta Banda y que datan del Cretácico (Fig. 9, Beltrán y Quintanilla, 2001).
2. Las interacciones entre el agua caliente y las rocas ígneas a temperaturas elevadas y alta presión. Esto es producto de la interacción del agua de mar con basaltos a alta presión y temperatura en una solución de NaCl , ácida ($\text{pH}=5.2$) y reductora, enriquecida con Ca^{2+} , SiO_2 , H_2S y metales traza reducidos en Mg^{2+} y SO_4^{2-} (Vidal y Vidal, 1981).

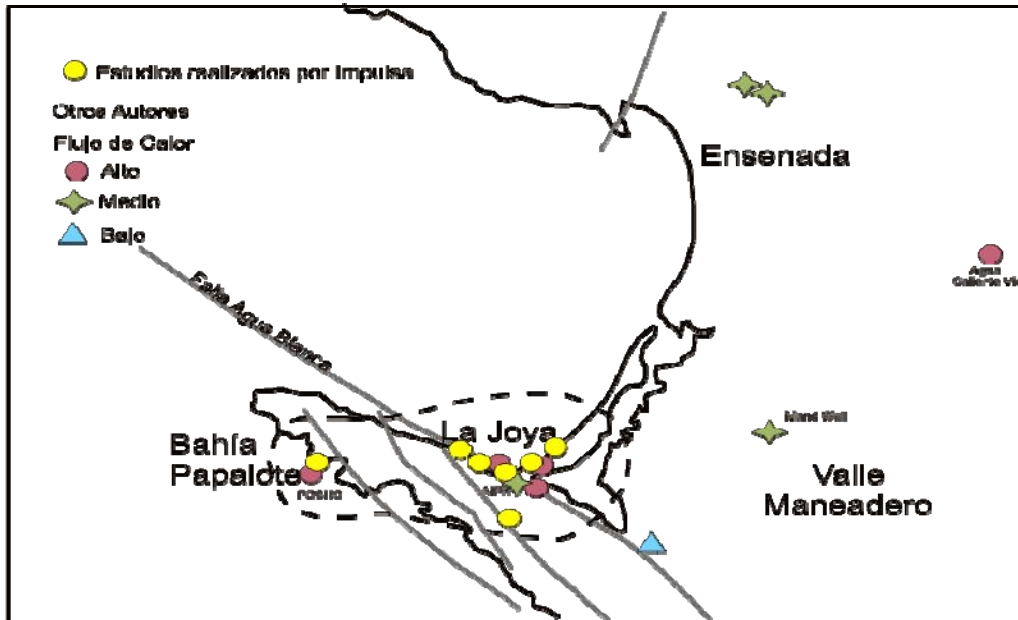


Fig. 10. Península de Punta Banda con temperatura superficial del agua de 55°C a 108°C. Estudios realizados por otros autores fueron tomados de Vidal (1981), Beltran y Quintanilla (2001)

La composición isotópica del agua termal (Fig. 11) descargada por los manantiales submarinos y subaéreos indican que ésta es una mezcla de agua meteórica y agua de mar (Canet y Prol Ledesma, 2006).

Muestra	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$
Urpn	-7.07	-51.3
JII-1	-7.36	-51.8
JII-1	-7.39	-57.7
JII-1	-2.7	-25.9
AgCln	-2.83	-27.9
SnC	-1.74	-33.3
LPc	-4.6	-36.8
Blc	-0.06	-8.7
Blc.V.	-0.43	-4.9
V.Buf.	-1.75	-20.8
Mand Well *	-6.62	-46.1
AgCln Vid *	-7.65	-51.5
MPB *	-5.33	-37.7
PBSHS *	-3.44	-27.3
PBSW *	-0.27	-2.3

Tabla 2. Composición Isotópica de las muestras tomadas en campo. * Muestras tomadas por Vidal (1978).

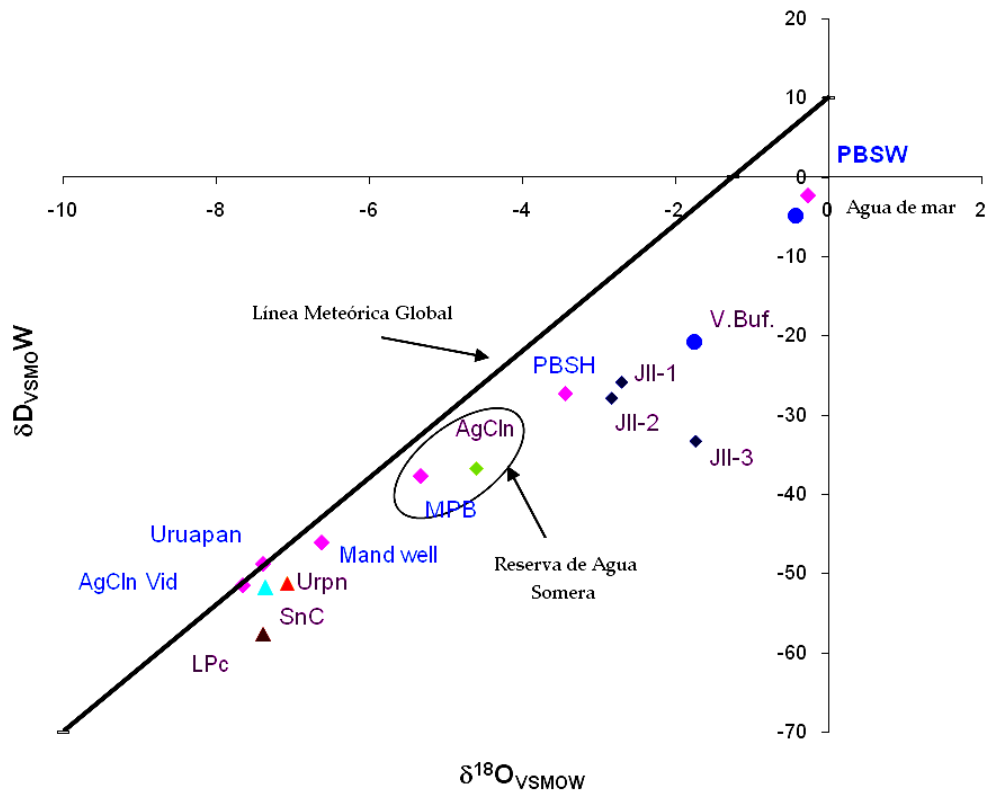


Fig. 11. Composición isotópica de las muestras de agua de manifestaciones geotermiales (Prol Ledesma et al., 2008, comunicación personal)

El agua termal de los manantiales lejos de la costa (Uruapan, SnC y LPc) tienen una mezcla de agua subterránea y esto se muestra por la alta concentración de Mg.

Agua Caliente y las muestras de ventilas submarinas son localizadas relativamente cerca, en un área donde la composición isotópica indica una reserva somera, ocurre una mezcla de agua subterránea y agua de mar.

El sistema hidrotermal de Punta Banda es producto de una circulación profunda a lo largo de la Falla de Agua Blanca. Los movimientos divergentes de las placas producen grietas, permitiendo el traslado vertical de calor magmático.

La zona de Punta Banda es la que tiene una mayor contribución de agua termal directa del yacimiento somero.

En la zona de Bahía Papalote (La Bufadora) se caracteriza por tener una actividad hidrotermal más alta con valores de temperatura de 55°C a 108°C, donde la zona de Agua Caliente-Manglar presenta una mayor temperatura de sílice.

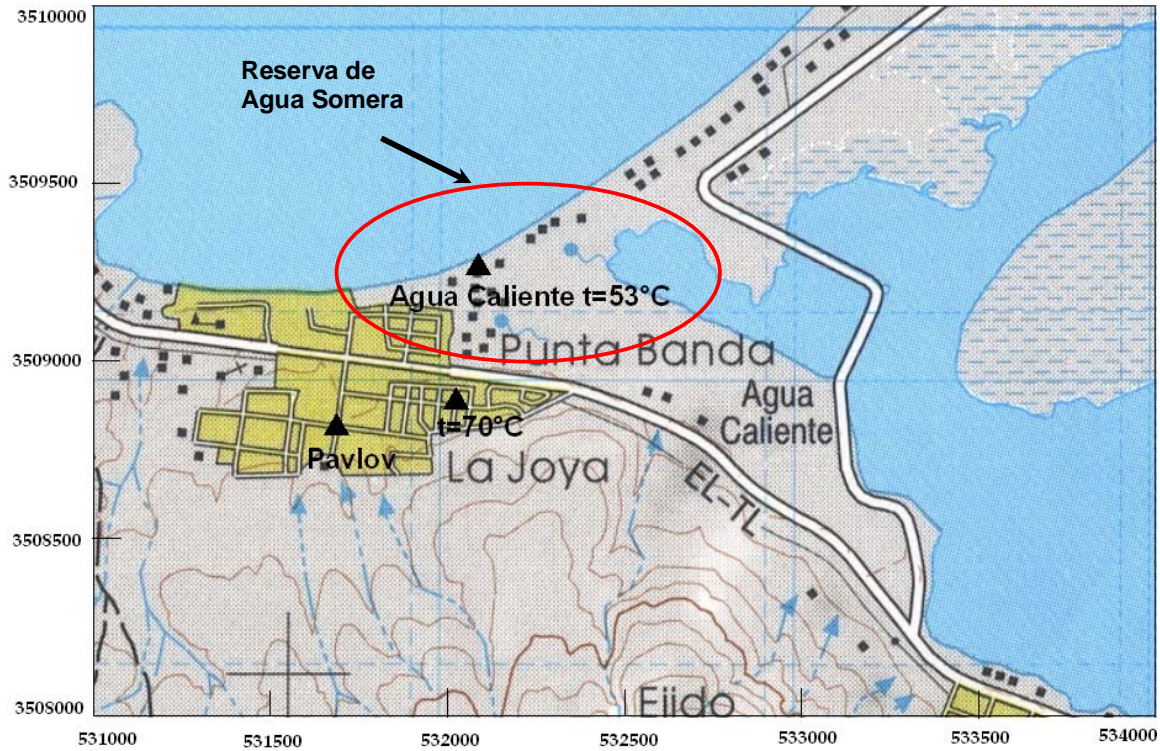


Fig. 12. Zona potencialmente termal en el área de La Joya, en la Península de Punta Banda.

Las evidencias geoquímicas anteriormente expuestas permiten concluir que existen tres categorías de manantiales correspondientes a diferentes tipos de interacción agua-roca que a su vez indican tres diferentes tipos de flujo de calor: alto, medio y bajo de las aguas que emergen en los manantiales. Mostrando que los manantiales de La Joya presentan un mayor potencial geotérmico, aunque estos manantiales también presentan agua mezclada: meteórica, geotérmica y agua de mar.

CAPITULO 4. MÉTODOS ELÉCTRICOS

En este capítulo se describen los métodos eléctricos de exploración. Estos métodos investigan potenciales eléctricos naturales y propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales como son: conductividad, permeabilidad y permitividad.

El propósito de los estudios de resistividad eléctrica es determinar la distribución espacial de la resistividad en el subsuelo realizando mediciones sobre la superficie. El método resistivo consiste en introducir una corriente eléctrica continua en el terreno por un par de electrodos y posteriormente medir la diferencia de potencial entre otro par de electrodos. La relación de estas dos magnitudes es lo que se conoce como resistividad aparente.

Este método puede aplicarse a la detección de reservas geotérmicas, localización de restos arqueológicos y exploración de agua subterránea. Su aplicación es menor en la exploración minera y petrolera. Destaca el bajo precio de los equipos empleados y su fácil implementación, si bien requiere de un procedimiento laborioso (desplazamiento de los electrodos y cables).

La Tomografía Eléctrica, descrita en el presente capítulo es una combinación geométrica del método resistivo. Esta es la técnica que se toma como base para la caracterización de la zona de estudio.

4.1. FUNDAMENTOS DE LA TEORIA DE RESISTIVIDAD

El comportamiento físico de las rocas depende de su contenido de agua y modo de agregación de sus minerales, forma, volumen, porosidad, temperatura y presión.

La Resistividad es una medida de la dificultad de la corriente eléctrica a su paso en un material determinado. La resistencia de un conductor es independiente de la corriente y del voltaje.

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. 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.

El método de Resistividad considera un cuerpo semi-infinito con una resistividad uniforme, en donde se colocan cuatro electrodos, dos de corriente y dos de potencial. El gradiente de potencial es medido por un voltímetro o potenciómetro. El método de resistividades es una aplicación práctica de la Ley de Ohm.

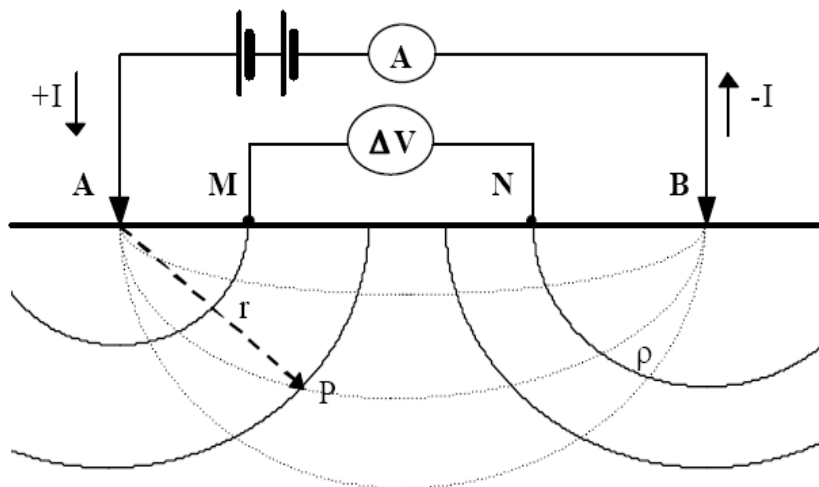


Fig. 13. Superficies equipotenciales

Las ecuaciones matemáticas que explican el fenómeno físico, son las Ecuaciones de Maxwell (Eq. 1), que rigen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos.

$$\nabla_x \bar{E}(\bar{r}) = -\frac{\partial \bar{B}(\bar{r})}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla_x \bar{H}(\bar{r}) = \bar{J}(\bar{r}) + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

Para los regímenes estacionarios no existen cambios temporales por lo tanto las ecuaciones anteriores (Eq. 1) se expresan de la siguiente manera:

$$\nabla_x E(\bar{r}) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla_x H(\bar{r}) = \bar{J}(\bar{r}) \quad (3)$$

Si se considera una fuente puntual, es decir un electrodo de corriente, las ecuaciones que rigen al campo eléctrico son

$$\nabla_x E(\bar{r}) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot E(\bar{r}) = I\rho\delta(\bar{r}) \quad (5)$$

Ahora, consideramos Eq.4, nos dice que el campo E es conservativo e irrotacional por lo que derivan de un potencial escalar U

Suponiendo $\bar{E}(\bar{r}) = -\nabla V(\bar{r}) \quad (6)$

Tenemos $\nabla^2 V(\bar{r}) = -I\rho\delta(\bar{r}) \quad (7)$

En una región donde no existe fuente el potencial satisface

$$\nabla^2 V(\bar{r}) = 0 \quad (8)$$

Que es la ecuación de Laplace donde también la divergencia de $\bar{E}(\bar{r})$ es cero. La ecuación de Laplace será válida en todo el semiespacio conductor, excepto en los electrodos.

$$R = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (9)$$

$$-dV = RI \quad (10)$$

Sustituyendo Eq. 9 en Eq.10, e integrando se obtiene

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (11)$$

Por lo tanto la diferencia de potencial entre los puntos M y N está indicada por

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (12)$$

Despejando la resistividad

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (13)$$

Donde

$$k = \left(\frac{2}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \right) \quad (14)$$

Es llamado el factor geométrico medido en m, y sólo depende de la posición relativa de los cuatro electrodos.

4.1.1. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad de algunos materiales para transmitir corriente eléctrica cuando es aplicado un voltaje. Su inverso es la resistividad eléctrica.

En rocas y minerales la conductividad eléctrica puede darse de las siguientes formas:

1. Electrónica. Es la forma normal de flujo de corriente en materiales que poseen electrones libres, como en el caso de los metales.
2. Electrolítica. Cuando el agua presente en los poros tiene alguna sal en solución, los iones constituyentes se separan, por lo que son libres para moverse independientemente en la solución
3. Conducción Dieléctrica. Se lleva a cabo en conductores pobres o aislados bajo la presencia de un campo eléctrico variable.

La mayoría de las rocas no son buenas conductoras de corriente eléctrica, son prácticamente aislantes debido a que los minerales formadores de roca también lo son, sin embargo, la presencia de poros y fracturas tiene como resultado que los valores de conductividad se incrementen. Generalmente la conducción eléctrica de una roca se da por procesos electrolíticos debido a que poros y fracturas contienen algún porcentaje de agua. La conductividad dependerá de la cantidad de agua presente así como de su salinidad y distribución en la roca almacén.

Cuando en la conducción electrolítica se aplica un campo eléctrico los iones positivos (cationes) son atraídos hacia el polo negativo, mientras que los iones negativos (aniones) se ven atraídos hacia el polo positivo. Por lo tanto, en una roca la conductividad dependerá de la permeabilidad, lo que incluye el número de poros, dimensión e interconexiones, el grado de humedad, la concentración de electrolitos disueltos, así como la temperatura y fase en que se encuentra el agua de poro.

Existe una relación indirecta entre la conductividad y la edad geológica de una roca debido a que ambas están relacionadas con la porosidad (Keller y Frischknecht, 1966). Las rocas más antiguas son por lo general menos porosas ya que se encuentran a una mayor profundidad, lo que ocasiona que por presión los espacios porosos sean cerrados.

Sin embargo, pueden darse excepciones por factores como la presencia de fallas en las rocas que normalmente no son porosas o altas concentraciones de minerales conductores, lo que en ambos casos podría dar un incremento en la conductividad eléctrica.

Edad geológica	Arena marina, pizarra, grauwaca	Arenas terrestres, argilita, arcosa	Rocas volcánicas como basaltos, riolitas, tobas	Granito, gabro	Caliza, dolomia, anhidrita, sal
Cenozoico	1 - 10	15 - 50	10 - 200	500 - 2000	50 - 5000
Mesozoico	5 - 20	25 - 100	20 - 500	500 - 2000	100 - 10,000
Carbonífero	10 - 40	50 - 300	50 - 1000	1000 - 5000	200-100,000
Paleozoico	40 - 200	100 - 500	100 - 2000	1000 - 5000	10.000 - 100,000
Precámbrico	100 - 2000	300 - 5000	200 - 5000	5000 - 20,000	10.000 - 100,000

Tabla 3. Relación de resistividades eléctricas de acuerdo con la litología y edad geológica (Keller y Frischknecht, 1966). Valores de resistividad en ohm-m.

4.1.2. Concepto de Resistividad Aparente

Un semiespacio homogéneo de resistividad ρ rara vez se da en la naturaleza ya que el subsuelo no consta de capas homogéneas y que la homogeneidad lateral es difícil de esperar, por lo tanto en la prospección geofísica se trabaja bajo el concepto de resistividad aparente ρ_a .

Definimos a la resistividad aparente en un semiespacio homogéneo con heterogeneidades donde las lecturas cambiaran de una posición a otra obteniendo una ρ diferente a la del semiespacio homogéneo. Esta variable no es el promedio de los valores de ρ obtenidos del subsuelo, sino el valor de medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo de electrodos y es función del espaciamiento de los electrodos y de la distribución real de la ρ . Es decir, la resistividad de un terreno imaginario, homogéneo e isótropo, equivalente al terreno real heterogéneo.

Relación con los elementos del Subsuelo.

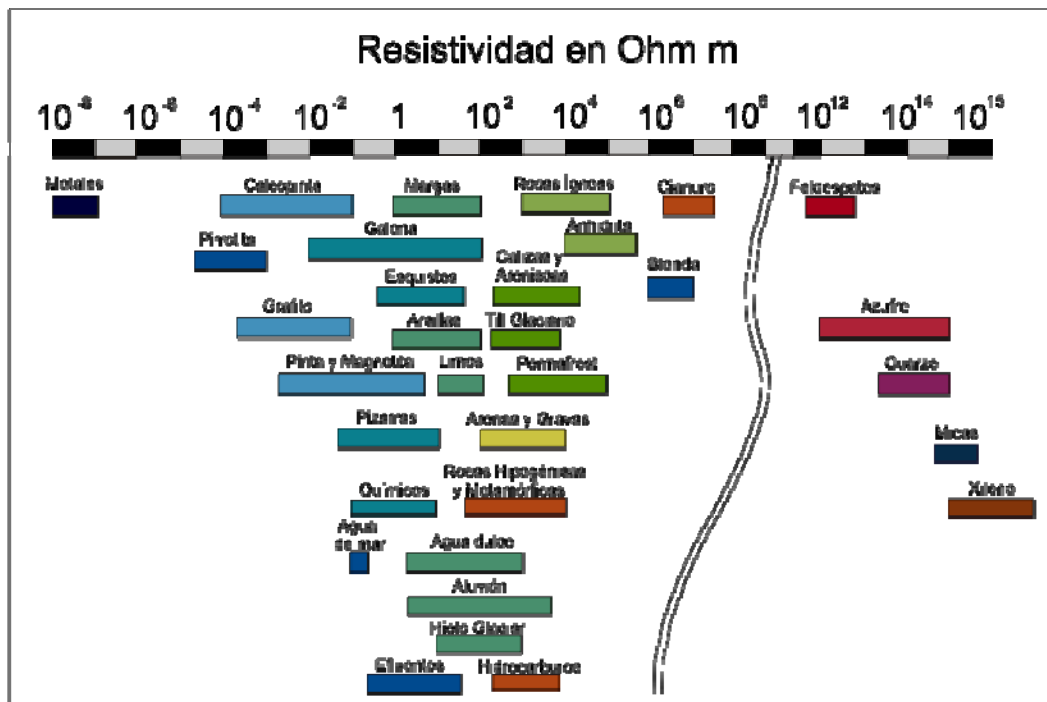


Tabla 4. Valores de resistividad de las rocas más comunes, materiales de suelo y algunas sustancias químicas (Keller y Frischknecht 1966, Orellana 1982).

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen valores altos de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que poseen, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno. Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen aún valores más bajos de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores de resistividad más bajos que el suelo arenoso. Sin embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que la resistividad de un muestreo particular del suelo o roca depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

Los metales, tal como hierro, tienen valores de resistividad sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de resistividad del agua del terreno a menos de 1 ohm-m con moderadas concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Los compuestos de hidrocarburos, típicamente tienen valores muy altos de resistividad.

4.2. DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS

Un conjunto de electrodos recibe el nombre de dispositivo electródico. La medición del potencial eléctrico en un semiespacio homogéneo se hace mediante un dispositivo eléctrico o un arreglo geométrico de electrodos. En general consta de cuatro electrodos, A y B los electrodos de corriente, positivo y negativo respectivamente, y M y N los electrodos de potencial, entre los cuales se mide la diferencia de potencial creada por la corriente que circula entre A y B.

Existen diversos tipos de dispositivos, lineales y simétricos con respecto al centro de simetría del sondeo. En principio, los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno.

La mejor elección de configuración para un sondeo de campo depende del tipo de estructura a ser estudiada, profundidad, la sensibilidad de aparato y el nivel de ruido de fondo de la zona de estudio (Urbieta, 2001).

4.2.1. Dispositivo Schlumberger

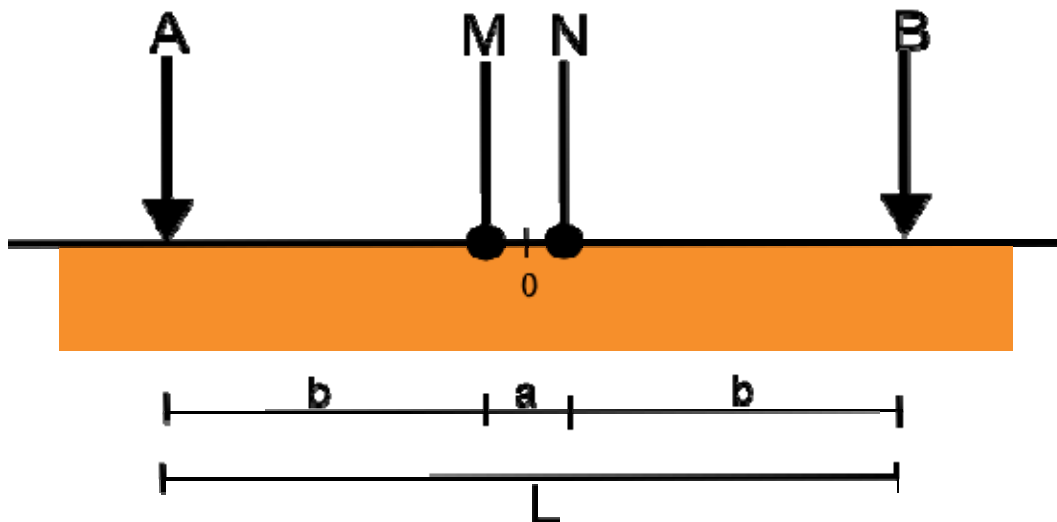


Fig. 14. Esquema de configuración eléctrica del Dispositivo Schlumberger

Es un dispositivo lineal que consta de cuatro electrodos. L cambia, al ser AB pero MN se mantiene fijo.

$$\rho_a = \pi L^2 \frac{\Delta V}{Ia} \quad (15)$$

4.2.2. Dispositivo Wenner

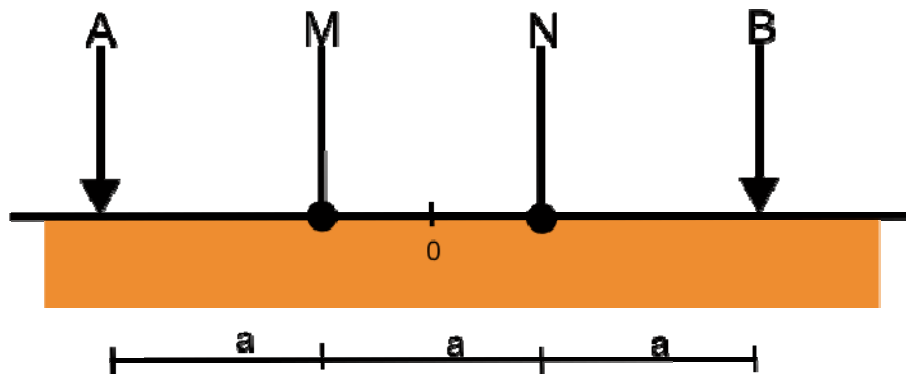


Fig. 15. Esquema de la configuración eléctrica del Dispositivo Wenner

Al igual que el Schlumberger es un dispositivo lineal de cuatro electrodos. En este dispositivo los electrodos AMNB son equidistantes entre si, a una distancia a . En la figura se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos.

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

4.2.3. Dispositivo polo-dipolo

En este dispositivo un electrodo (B) se lleva a una gran distancia (teóricamente en el infinito) de los otros tres (AMN).

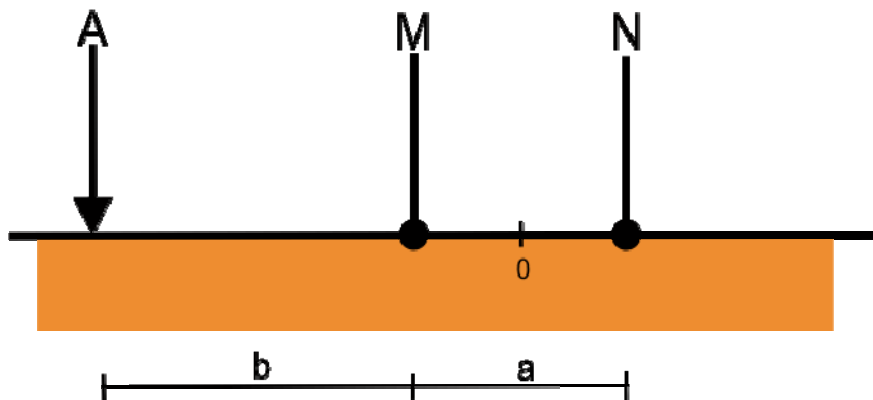


Fig. 16. Representación de la configuración eléctrica del Dispositivo Polo-Dipolo

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (17)$$

4.2.4. Dispositivo doble dipolo (axil)

En este dispositivo los electrodos se disponen sobre una línea en el orden ABMN formando así un doble dipolo. Este dispositivo se denomina a veces *dispositivo dipolo-dipolo*.

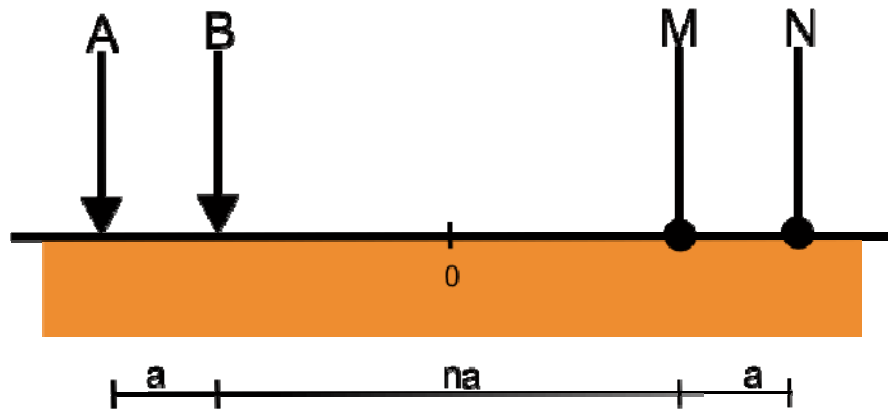


Fig. 17. Esquema de la configuración eléctrica del Dispositivo Dipolo-Dipolo

$$\rho = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I} \quad (18)$$

4.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA DE CORRIENTE CONTINUA

Existen infinidad de configuraciones de campo para los métodos eléctricos. La diferencia entre las distintas configuraciones reside en el tipo de transmisor y receptor de corriente utilizados en el campo, y en como se sitúan en el campo estos transmisores o receptores. Los métodos eléctricos tienen la ventaja de ser mucho más sencillos en el procesado y la interpretación pero su mayor desventaja es que cualquier material aislante o muy conductivo puede imprimir su huella a los materiales que lo rodean.

Los valores de resistividad tienen un gran rango comparado a otras cantidades físicas obtenidas por otros métodos Geofísicos. La resistividad de las rocas y el suelo en un área de estudio pueden variar por varios órdenes de magnitud. En comparación, la densidad usada en investigaciones gravimétricas usualmente cambia por debajo de un factor de 2, las velocidades sísmicas normalmente no cambian por más de un factor de 10. Esto hace que los métodos geoeléctricos sean una técnica geofísica muy versátil.

Las técnicas de prospección eléctrica de corriente continua generalmente se dividen en:

1. Calicata Eléctrica
2. Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).
 - a. Schlumberger
 - b. Wenner
3. Tomografías Eléctricas
 - a. Wenner
 - b. Wenner-Schlumberger
 - c. Dipolo-Dipolo
 - d. Polo-Dipolo

4.3.1. Calicata Eléctrica

Son medidas de potencial mediante las cuales se determinan resistividades del terreno hasta una profundidad fija. Es un método de investigación horizontal a profundidad constante para detectar estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad.

Las distancias entre los electrodos de corriente y de potencial son constantes, de manera que el arreglo de electrodos se mueve sin cambiar su forma en la superficie del terreno. La interpretación de este método es cualitativa.

Se aplica en el estudio de las variaciones laterales de resistividad en el subsuelo, pero no puede detectar cambios verticales de resistividad.

4.3.2. Sondeo Eléctrico Vertical

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos de corriente 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).

La mayor eficacia del método corresponde al caso en los que los sondeos se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitada por planos paralelos a la superficie del terreno, medio estratificado. Es tolerablemente válida para estratos inclinados hasta unos 30° .

Durante mucho tiempo, en prospección eléctrica, la profundidad de investigación ha sido considerada sinónimo de la profundidad de penetración de la corriente. Sin embargo, el efecto de una capa en los potenciales o campos observados en superficie no depende únicamente de la densidad de corriente que la atraviesa.

La profundidad de investigación característica es la profundidad a la que una capa delgada de terreno (paralela a la superficie) contribuye con participación máxima a la señal total medida en la superficie del terreno. La profundidad de investigación viene determinada por la posición de los electrodos de corriente y de potencial, y no sólo por la penetración o distribución de la corriente. Es decir, si se intercambian entre sí las posiciones de los electrodos de potencial con los de corriente, la distribución de las líneas de corriente cambia (Urbieta, 2001).

Sin embargo, la resistividad aparente y por tanto la profundidad de investigación no cambia. Definiendo L como la distancia entre los dos electrodos extremos (sin considerar los situados en el infinito), los mismos autores determinan la profundidad de investigación de diversos dispositivos eléctricos en un suelo homogéneo, siendo para el dispositivo polo-polo de $0,35L$, para Schlumberger de $0,125L$ y para Wenner de $0,11L$.

Barker (1989) la define la *profundidad de investigación efectiva* como la mitad de la señal medida en la superficie debida a la porción de suelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal debida a la porción de suelo inferior y muestra la mayor utilidad de ésta sobre la utilizada por Roy y Apparao (1971). Las profundidades de investigación efectiva para los dispositivos Wenner, Schlumberger y doble dipolo son respectivamente de $0,17L$, $0,19L$ y $0,25L$ (para este último la profundidad de investigación característica es de $0,195L$), es decir ligeramente mayores que utilizando la definición de profundidad de investigación característica (Roy y Apparao, 1971).

4.3.2.1. Sondeo Wenner

Dado el dispositivo Wenner AMNB con separación interelectródica a , el sondeo consiste en el aumento progresivo del valor de a manteniendo un punto central fijo P. Para la representación de los datos se muestra en ordenadas el valor de la resistividad aparente medida ρ_a en ohm-m, y en abscisas el valor de a en metros para cada paso.

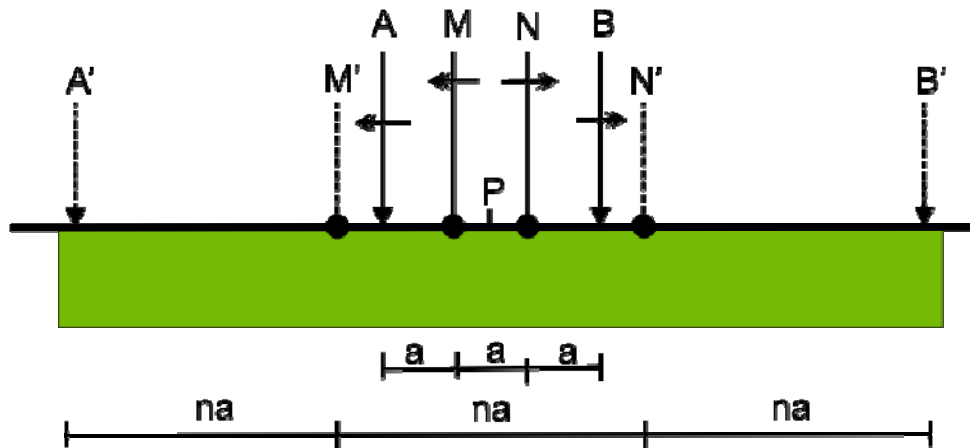


Fig. 18. Representación del Sondeo Wenner.

La profundidad teórica de investigación del sondeo alcanza un tercio de la distancia AB, pero en realidad puede variar de $AB/2$ hasta $AB/10$ según las características de los materiales del subsuelo.

4.3.2.2. Sondeo Schlumberger

Dado el dispositivo Schlumberger AMNB con $AB \gg 5MN$, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos de corriente A y B dejando los electrodos de potencial M y N fijos en torno a un punto central fijo P. La representación de este sondeo muestra en ordenadas ρ_a y en abscisas la distancia $AB/2$ m.

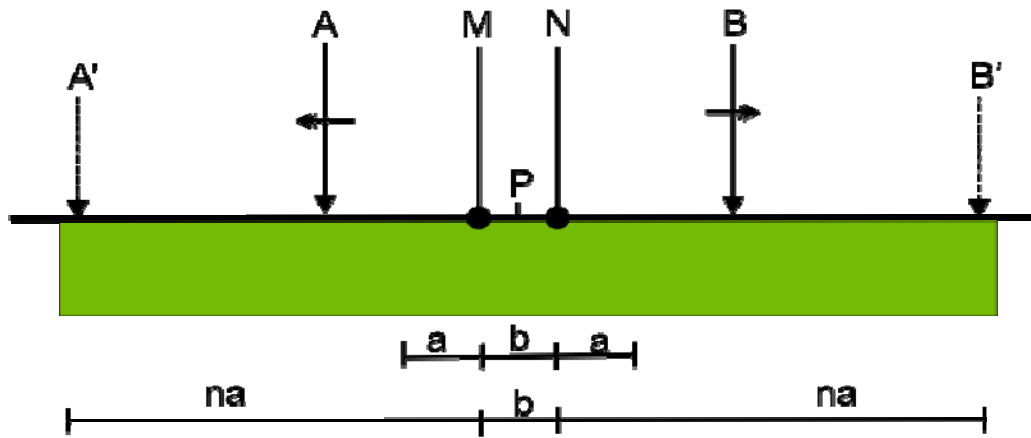


Fig. 19. Representación del sondeo Schlumberger

4.3.2.3. Efectos laterales en el SEV y ambigüedades en su interpretación

Si el dispositivo eléctrico está próximo a un contacto vertical, las líneas de corriente serán distorsionadas por lo que ΔV_{MN} se verá afectado por el otro medio, tanto más cuanto mayor sea la separación de los electrodos AB. Por lo tanto, la medida de la resistividad aparente en un SEV está influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Esto implica que para distancias AB grandes no se sabrá si la resistividad aparente es debida a cambios de estructuras en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de resistividades (Orellana, 1982).

Puede ocurrir que las curvas de resistividad aparente para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanece constante, lo que provoca una ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y su resistividad.

4.3.2.4. Aplicaciones

El SEV es aplicable cuando el objetivo tiene una posición horizontal y una extensión mayor que su profundidad. Tal es el caso del estudio de capas tectónicas, búsqueda de agua subterránea, infiltración de agua marina en zonas costeras, estratificación, etc. El SEV no es adecuado para contactos verticales, fallas, diques, etc.

4.3.3. Descripción de la Técnica de Tomografía Eléctrica

Es una técnica geofísica para el estudio del subsuelo que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico característico del mismo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno o desde perforaciones. Es un mapa de contornos de datos eléctricos que permiten la adquisición de valores de resistividad aparente en dos dimensiones.

Los datos proporcionados por este método están distribuidos de manera vertical de los puntos medidos. Un factor clave de esta técnica es el número y distribución de las medidas de campo ya que de él depende tanto su resolución como la profundidad de investigación.

Como regla general, un estudio de Tomografía Eléctrica requiere la obtención de gran número de datos.

El resultado final de este tipo de estudios es una imagen distancia profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos, geotécnicos o ambientales como demuestran los diversos ejemplos que se presentan.

La técnica de Tomografía se puede dividir en dos etapas principales, la primera con respecto a la toma de datos en campo y la segunda la inversión de los mismos, lo cuál produce una imagen eléctrica.

4.3.3.1. Adquisición de datos en campo con la Técnica de Tomografía Eléctrica

Para investigar la variación de resistividad en dos dimensiones se puede utilizar cualquier configuración de cuatro electrodos y las mediciones pueden ser hechas en cualquier secuencia.

La metodología de campo utilizada para adquisición los datos de resistividad aparente consiste en extender una batería de electrodos en línea separados por una distancia constante a variando la separación de los electrodos para cada nivel $(n \times a)$ con la finalidad de incrementar la profundidad de investigación.

La ecuación de Resistividad Aparente se utiliza para la construcción de una pseudosección, la cual involucra datos de resistividad transversales como una sección a profundidad donde cada valor de resistividad aparente es graficado como si fuera la resistividad verdadera de un punto en una profundidad proporcional al espaciamiento de los electrodos.

La elección de la mejor modalidad para un trabajo de campo depende de diversos factores, tales como la estructura de estudio, la sensibilidad, la profundidad de investigación, la intensidad de la señal y el nivel de ruido ambiental.

4.3.3.1.1. Arreglo Tipo Wenner

Los electrodos se colocan a lo largo de la línea de estudio a una distancia a de separación (Fig. 20). En la adquisición de datos para el primer nivel $(n = 1)$ (Fig. 20a) se utilizan los primeros cuatro electrodos, donde los electrodos 1 y 4 son los de corriente, A y B respectivamente, los electrodos 2 y 3 son los de potencial, M y N, para obtener el segundo dato de resistividad aparente del nivel 1 se utilizan los electrodos 2, 3, 4 y 5 donde los electrodos 2 y 5 son los de corriente y los electrodos 3 y 4 son los de potencial y así sucesivamente hasta terminar las mediciones del nivel 1.

Para adquirir los datos de resistividad aparente a lo largo de la línea de estudio en el nivel 2 (Fig. 20b), se utilizan los electrodos 1, 3, 5 y 7 donde los electrodos de corriente son el 1 y 7 mientras que los de potencial son los electrodos 3 y 5, la separación entre A – M, M – N y N – B es $n \times a$. Esto se repite a lo largo de toda la línea de electrodos hasta llegar al nivel n deseado.

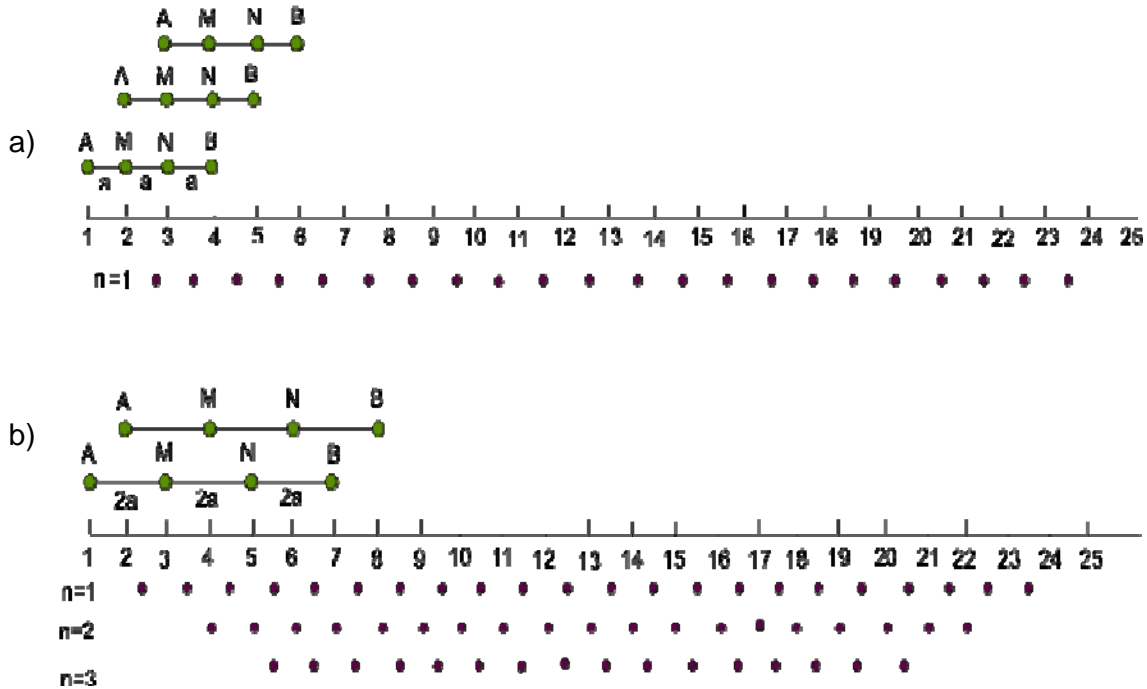


Fig. 20. a) Construcción de la sección de datos de Resistividad Aparente del nivel 1 del arreglo tipo Wenner. b) Distribución de medidas de los siguientes niveles.

Esta modalidad es buena para resolver cambios verticales, pero relativamente pobre en la detección de cambios horizontales. Su profundidad de investigación es moderada de aproximadamente el 30% de la longitud del tendido, con una intensidad de señal fuerte. Con un factor geométrico de $k = 2\pi a$.

4.3.3.1.2. Arreglo Tipo Wenner-Schlumberger

La metodología de adquisición es similar a la del dispositivo Wenner pero en este caso el factor $n \times a$ es la distancia entre los electrodos A y M o N y B (Fig. 21).

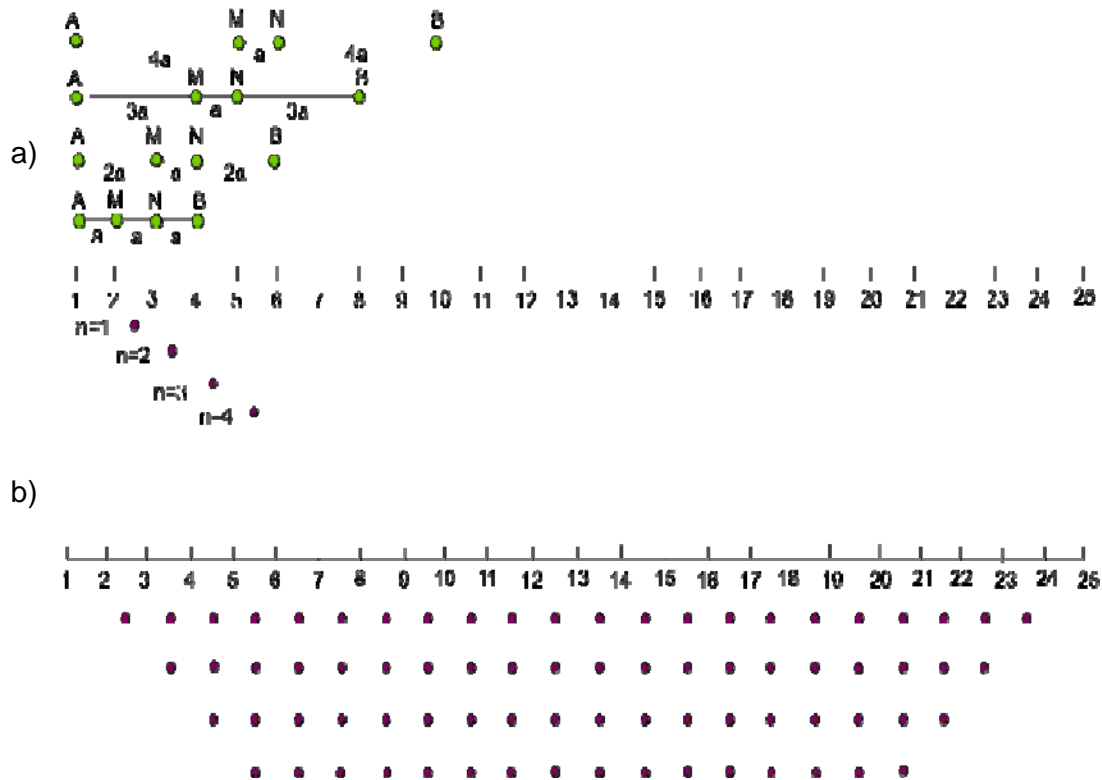


Fig. 21. a) Construcción de la sección de datos de Resistividad Aparente del arreglo tipo Wenner- Schlumberger. b) Distribución de las medidas respecto a la posición de los electrodos.

Esta modalidad es moderadamente sensitiva a estructuras horizontales como verticales. Su profundidad de investigación es aproximadamente del 20% de la longitud total del tendido. La intensidad de señal es más pequeña que la de la modalidad Wenner pero mas alta que la modalidad Dipolo-Dipolo (Urbieta J.,

2001). El factor geométrico es $k = \frac{\pi L^2}{a}$.

4.3.3.1.3. Arreglo Tipo Dipolo-Dipolo

Se colocan todos los electrodos necesarios equidistantes a lo largo de la línea de estudio y se procede a realizar la adquisición de datos de resistividad aparente; existen dos formas de realizar las mediciones de tomografía eléctrica con este dispositivo, una es por niveles, similar al dispositivo Wenner, y la otra es “profundizando”, es decir, no midiendo a un solo nivel sino a una misma profundidad.

Siguiendo la numeración de los electrodos mostrada en la Fig. 22, en la adquisición por niveles, los electrodos 1 y 2 son los electrodos de corriente A y B; los electrodos 3 y 4 son los de potencial M y N; la separación entre B – M es $na = a$, para el primer nivel $n = 1$. La segunda medida para este nivel consiste en utilizar los electrodos 2, 3, 4 y 5 donde los electrodos 2 y 3 son los de corriente y los electrodos 4 y 5 son los de potencial, manteniéndose constante la distancia B – M. Para la medida en el nivel 2 ($n = 2$) la separación entre los electrodos B – M se incrementa a $2a$ asegurando así que se está midiendo a mayor profundidad.

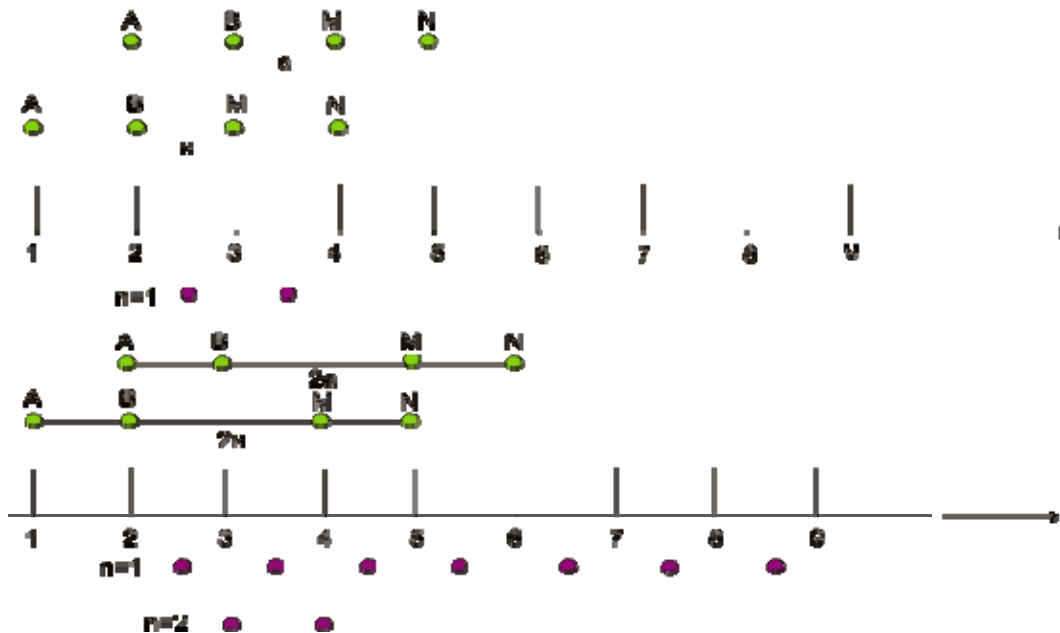


Fig. 22. Construcción de la sección de adquisición de datos de resistividad aparente por niveles del arreglo tipo Dipolo- Dipolo.

Para la adquisición en profundidad por niveles, se mantienen fijos los electrodos de corriente y se van moviendo los electrodos de potencial hasta alcanzar los niveles de medición deseados (Fig. 23).

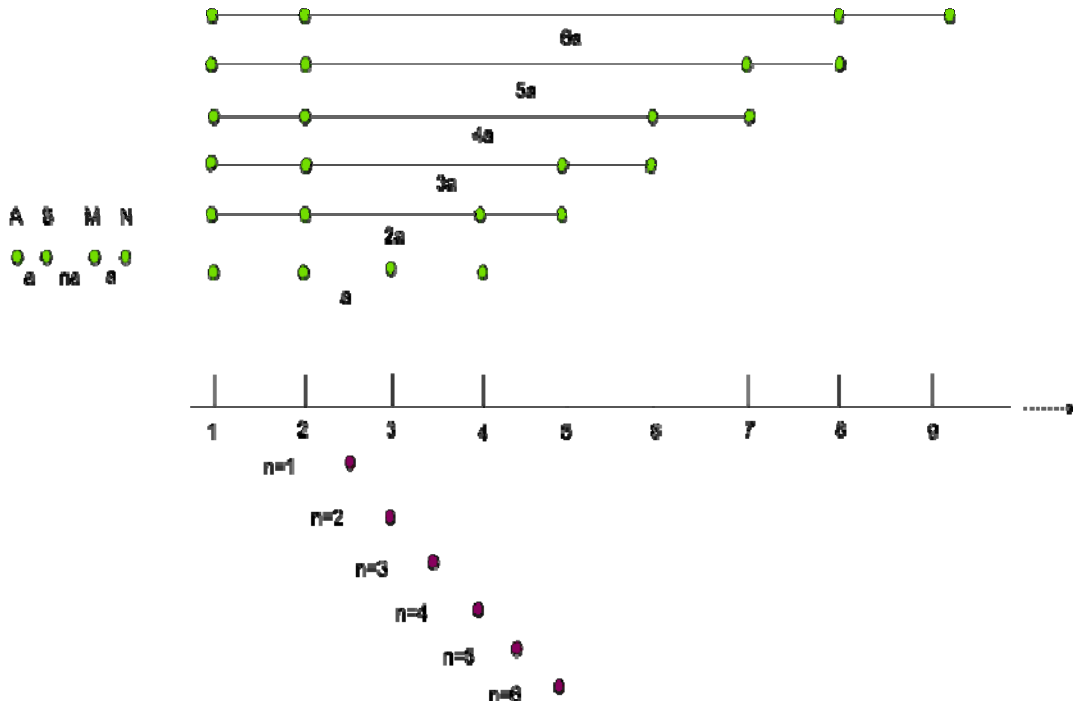


Fig. 23. Construcción de la sección de datos de resistividad aparente profundizando del arreglo tipo Dipolo-Dipolo

Esta modalidad es muy sensitiva a cambios horizontales de resistividad, pero relativamente insensitiva a cambios verticales. Su profundidad de investigación es somera comparada con la modalidad Wenner, de aproximadamente 15% de la longitud del tendido, pero pierde su intensidad de señal rápidamente. Con un factor geométrico de $k = \pi n a (n+1)(n+2)$.

4.3.3.2. Procedimiento para la Inversión de Datos

Un modelo es una representación matemática idealizada de una sección de la tierra, los parámetros del modelo son cantidades físicas que se obtienen de los datos observados.

El conjunto de datos de resistividad aparente en forma de una pseudosección se emplean para generar imágenes eléctricas. Las mediciones en la superficie de las variaciones de la resistividad aparente generan un modelo de la distribución espacial de la resistividad aparente del subsuelo. Todo método de inversión procura determinar un “modelo idealizado” del subsuelo que reproduzca los parámetros medidos de manera adecuada.

En el método de inversión en dos dimensiones utilizado por el programa RES2Dinv (Loke y Baker, 1995) los parámetros medidos son las resistividades aparentes, los parámetros calculados son las resistividades calculadas por el software a través de los elementos finitos y el modelo de resistividades reales producto de la inversión son los parámetros del modelo, el cual se acercará a la sección real del suelo en la medida en que los parámetros medidos y los calculados se asemejen. La optimización del método básicamente trata de reducir la diferencia entre los valores de resistividad aparente medidos y calculados.

La relación matemática que determina la diferencia entre los parámetros medidos y calculados viene dada por la aproximación a mínimos cuadrados. El programa emplea una nueva implementación del método de mínimos cuadrados basados en la técnica de optimización cuasi-Newton. Esta técnica es significativamente más rápida que el método convencional de mínimos cuadrados.

El modelo utilizado en el Res2dinv divide la superficie en cierto número de bloques rectangulares con el fin de determinar la resistividad de cada bloque rectangular que puede producir una pseudosección de resistividad aparente de acuerdo con las mediciones tomadas (Fig. 24).

4.4. MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN CON LAS DIFERENTES TÉCNICAS DE CORRIENTE CONTINUA

La finalidad de los métodos de interpretación con las técnicas de corriente continua es determinar la distribución espacial de las resistividades verdaderas en el subsuelo, partiendo de los datos de resistividad aparente obtenidos.

- Sondeos Eléctricos Verticales.

La idea básica para la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales es la comparación de la curva de campo que se desea interpretar con las curvas teóricas de ciertos catálogos, hasta encontrar una de estas que coincida con la primera. Estas curvas se representan en escalas logarítmicas, con lo que se consigue una reducción en el número de curvas teóricas necesarias, es decir, por propiedades de los gráficos logarítmicos, la multiplicación de todos los espesores o de todas las resistividades por una constante solo produce un desplazamiento sin cambiar la forma y tamaño.

Para la interpretación se utilizó el software IPI2WIN, desarrollado por la Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics, el cual permite realizar interpretaciones automatizadas o semi-automatizadas de Sondeos Eléctricos Verticales a partir de datos obtenidos por los arreglos utilizados en prospección eléctrica. El proceso interactivo es resuelto usando filtrado lineal. La implementación del algoritmo de filtrado provee una solución rápida y precisa para una amplia gama de modelos que cubren todas las situaciones geológicas razonables. El problema inverso es resuelto usando una variante del algoritmo de Newton para el número mínimo de capas, de manera independiente para cada curva.

IPI2WIN está diseñado para la interpretación de las curvas de datos obtenidas de los sondeos a lo largo de un perfil. El objetivo principal es obtener un resultado geológico que nos permita definir las características del subsuelo en la zona estudiada.

- Tomografía Eléctrica

Tomando en cuenta que la estructura del subsuelo es bidimensional y las mediciones del perfil son perpendiculares a la dirección del rumbo de una estructura el problema se trata de forma bidimensional. Los valores de resistividades de la pseudosección son cualitativamente relacionadas a la distribución de resistividad verdadera en la sección del terreno bajo el perfil.

La interpretación de los modelos se hace a través de un método iterativo automático, RES2DINV es un programa que determina computacionalmente un modelo de resistividad de dos dimensiones, para una superficie de datos obtenidos de estudios de imágenes eléctricas.

El modelo de dos dimensiones usado por la inversión del programa, consiste en un cierto número de bloques rectangulares, los cuales están vinculados a la distribución de datos en la pseudosección. La distribución y el tamaño de los bloques son generados automáticamente por el programa usando la distribución de datos como guía.

La profundidad de la fila interior de bloques es aproximadamente igual a la profundidad de investigación de los datos con el máximo espaciamiento entre electrodos (Fig. 24).

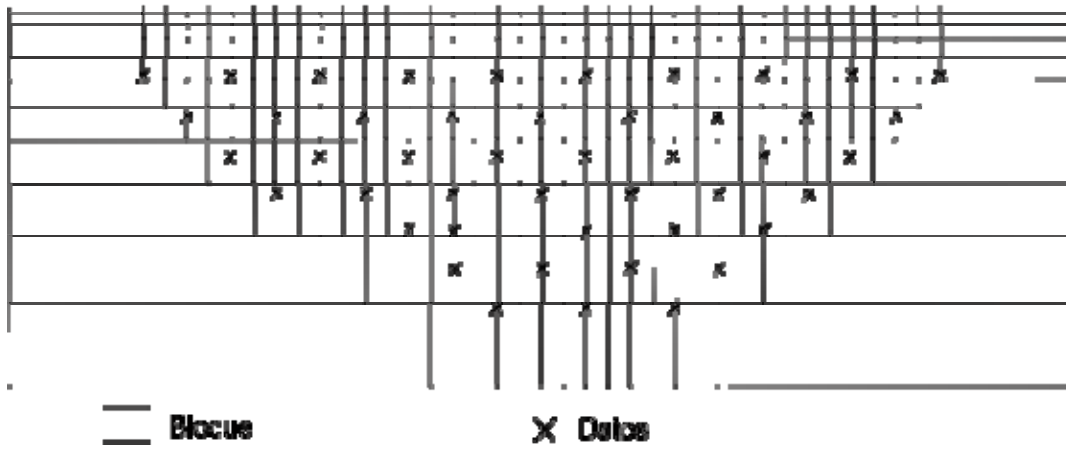


Fig. 24. Arreglo de bloques generado por el programa Res2dinv

Una buena resolución del modelo de bloques depende de la relación de la resistividad de los bloques y las del ambiente, también el resultado depende de él arreglo de electrodos utilizado (Sumanovac et al., 2007).

CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS

5.1. DESCRIPCIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Una de las ventajas que ofrecen los métodos eléctricos es la posibilidad de obtener información del subsuelo a bajo costo con el fin de obtener un modelo geológico que nos permita definir las características del subsuelo en la zona de estudio sin necesidad de perforaciones.

El principal objetivo de este estudio es el mapeo de zonas potencialmente productivas de agua caliente.

Este estudio está basado en tres tomografías eléctricas modalidad Dipolo-Dipolo, con orientación este-oeste, con una separación entre electrodos de 40 m, cubriendo una distancia horizontal de 480 m, 800 m y 560 m para las tomografías 1, 2 y 3 respectivamente. Dos sondeos eléctricos verticales tipo Schlumberger con orientación Este-Oeste y un AB/2 máximo de 500 m. Los datos de resistividad aparente fueron interpretados por el programa RES2DINV para las tomografías y el programa IP2WIN para los sev's.



Fig. 25. Esquema de los tendidos realizados en Punta Banda

	X	Y
Tomografía 1	532266	3508738
	531799	3508768
Tomografía 2	532428	3508775
	531989	3508825
Tomografía 3	532142	3508828
	532568	3509194
SEV 1	531881	3509029
SEV 2	532256	3508966

Tabla 5. Coordenadas de Ubicación de Tomografías y SEV's

5.1.1. Instrumentación

Para la toma de datos se empleó el siguiente equipo:

- Un transmisor **TSQ-3** de corriente directa, Scintrex, con potencia de 3 kW, alimentado por un motogenerador de 400 Hz. El equipo entrega una señal conmutada de pulsos cuadrados con periodo seleccionable y proporciona lectura digital de la corriente eléctrica de salida con resolución de 1 mA.
- Un receptor **IPR -10**, Scintrex, de potencial eléctrico con presentación digital de lecturas y selector de duración de los pulsos, así como con eliminador de potencial natural y selector de escala en volts, milivolts y microvolts.
- Electrodo de cobre para medir las diferencias de potencial eléctrico, y de acero para medir la corriente eléctrica, así como carretes con cable para interconectarlos.

5.2. RESULTADOS DE LAS IMÁGENES DE RESISTIVIDAD ELECTRICA Y SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES

5.2.1. Interpretación de la imagen eléctrica obtenida con la Tomografía 1

Para esta Tomografía se tomaron 46 datos, donde las mediciones alcanzaron 7 niveles (n=7) y una profundidad aproximada de 70 m (Fig. 26).

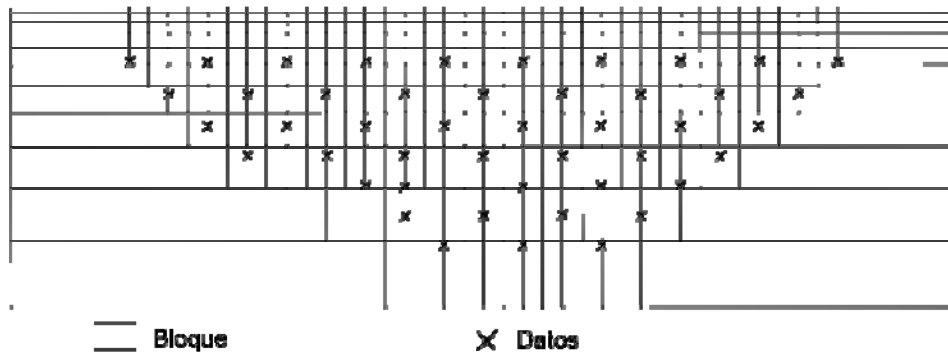


Fig. 26. Arreglo de bloques de la tomografía 1, con un No de bloques 300

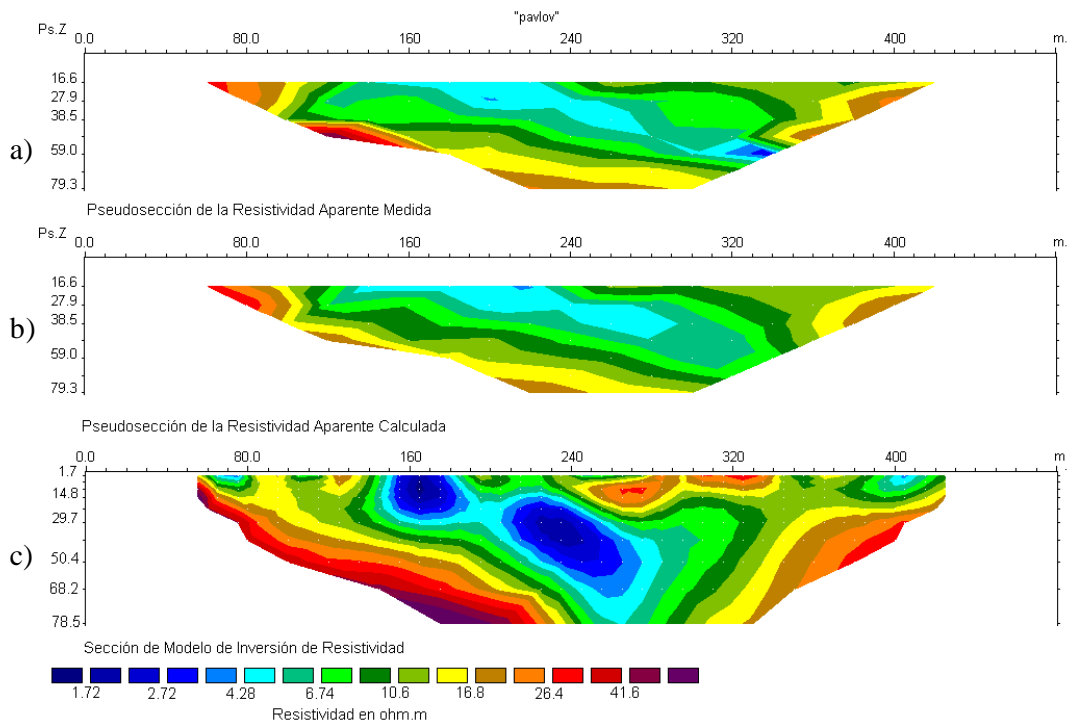


Fig. 27. Sección de Resistividad dada por la inversión del programa RES2DINV.

Con la inversión que realiza el programa, con 7 iteraciones y un error de 8.7%, se obtuvo una imagen eléctrica (Fig. 27c) en la cual se aprecia una serie de estratos con una alineación preferencial y de espesor homogéneo.

A los 150 m del inicio del perfil se encuentra una zona de baja resistividad, con resistividades de 1.84 ohm-m a 3.65 ohm-m. Esta zona se extiende hasta los 270 m del perfil, que alcanzan una profundidad de 60 m.

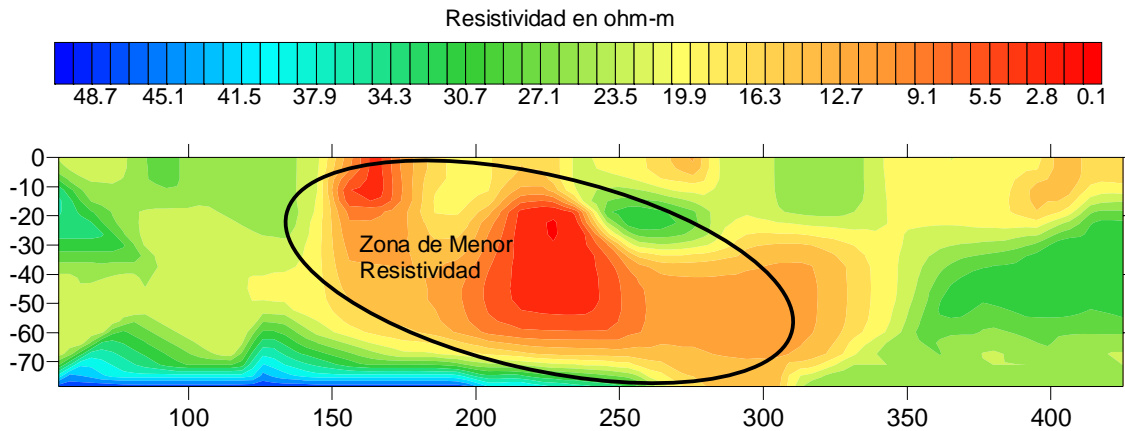


Fig. 28. Sección de Resistividad obtenida con interpolación del programa Surfer.

Para apreciar mejor la distribución de resistividades de los cuerpos geofísicos de interés realizamos un despliegue de la imagen resistiva en escala vertical lineal (Fig. 28) con el programa Surfer.

De estudios previos sabemos que en esta zona se encuentra un manantial termal con una temperatura aproximada de 70°C, lo que indica que la zona de mayor conductividad se trata de agua caliente.

La roca alrededor de zona termal presenta resistividades alrededor de 15 a 30 ohm-m, se trata de un estrato con saturación de agua, posiblemente debida al fracturamiento de la zona.

5.2.2. Interpretación de la imagen eléctrica obtenida con la Tomografía 2

En esta tomografía, realizada sobre la Carretera (Fig. 25) se tomaron 108 datos, alcanzado 8 niveles y una profundidad aproximada de 85 [m] (Fig. 29).

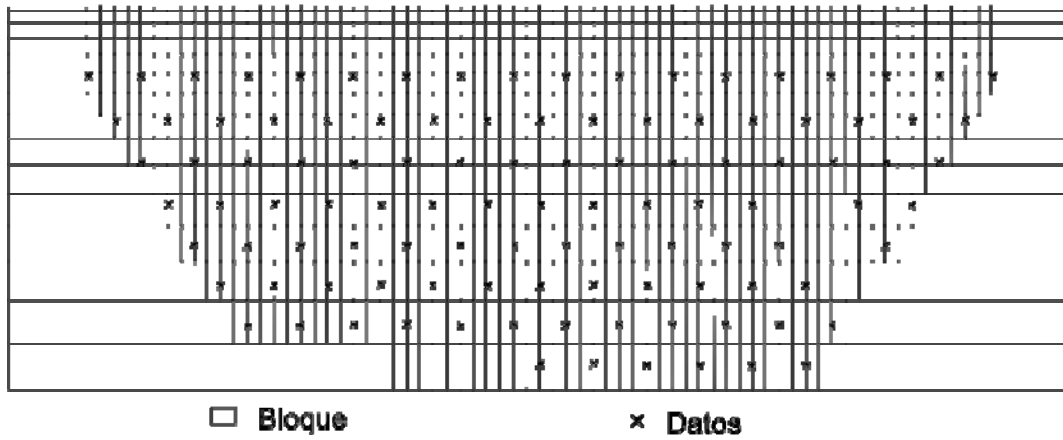


Fig. 29. Modelo de bloques de la Tomografía 2. No de Bloques 855.

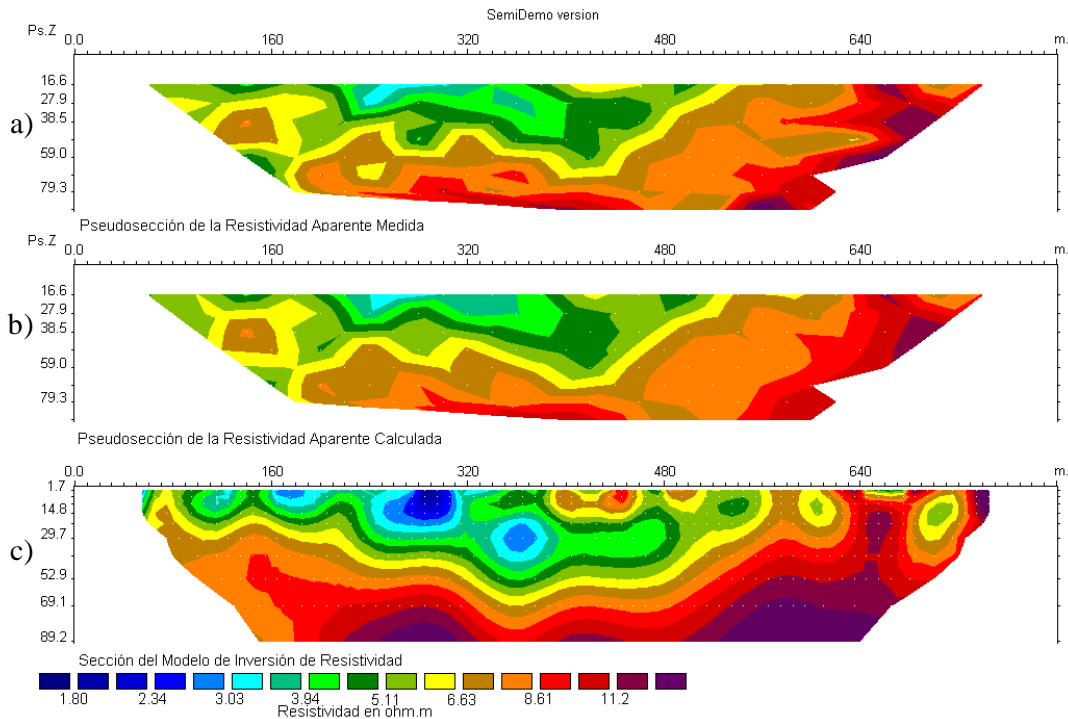


Fig. 30. Sección de Resistividad dada por la inversión del programa RES2DINV

La imagen eléctrica se obtuvo con 6 iteraciones y un error de 8.2%. Este perfil se caracteriza por estratos de espesor homogéneo, presenta cuerpos someros de baja resistividad.

En la Fig. 30c se aprecian zonas con resistividades alrededor de 1.8 ohm-m a 3 ohm-m, con una profundidad hasta 55 m, localizados a 250 m y 350 m del inicio del perfil. Estas zonas las podemos asociar con pequeñas concentraciones de agua caliente, no tan definidas como las del perfil anterior.

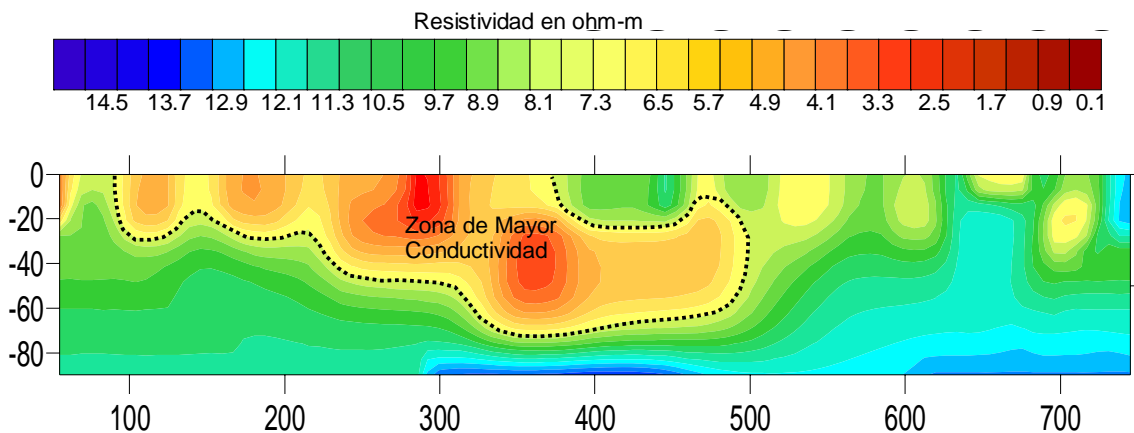


Fig. 31. Sección de Resistividad obtenida con interpolación del programa Surfer.

También para la mejor apreciación del perfil de resistividades desplegamos la imagen con escala vertical lineal en Surfer (Fig.31).

Las zonas de resistividades con valores de 5 ohm-m a 10 ohm-m son capas de estratos saturados de agua. Las resistividades que van desde los 10 ohm-m a los 13 ohm-m se tratan posiblemente de estratos de aluvión.

5.2.3. Interpretación de la imagen eléctrica obtenida con la Tomografía 3

Esta tomografía fue realizada paralela a la costa, comenzado desde un punto intermedio de la tomografía 2 (Fig. 25). Los datos para este perfil fueron 77, alcanzado su mayor profundidad a 90 [m], con 9 niveles (Fig. 32).

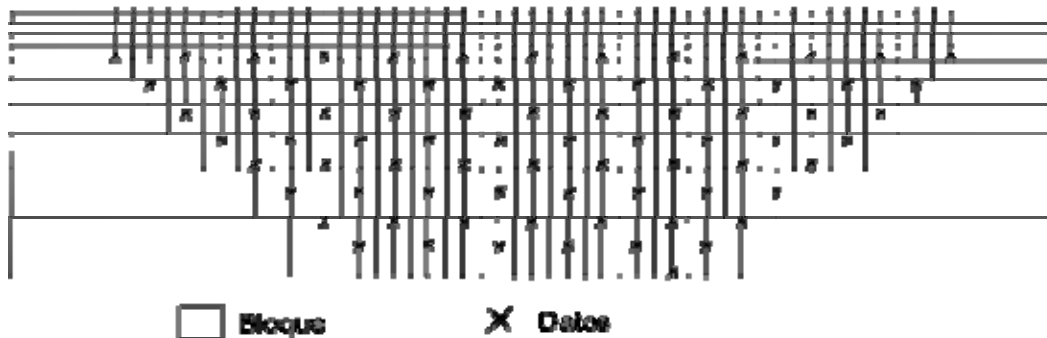


Fig. 32. Modelo de bloques de la Tomografía 3. No de Bloques 428.

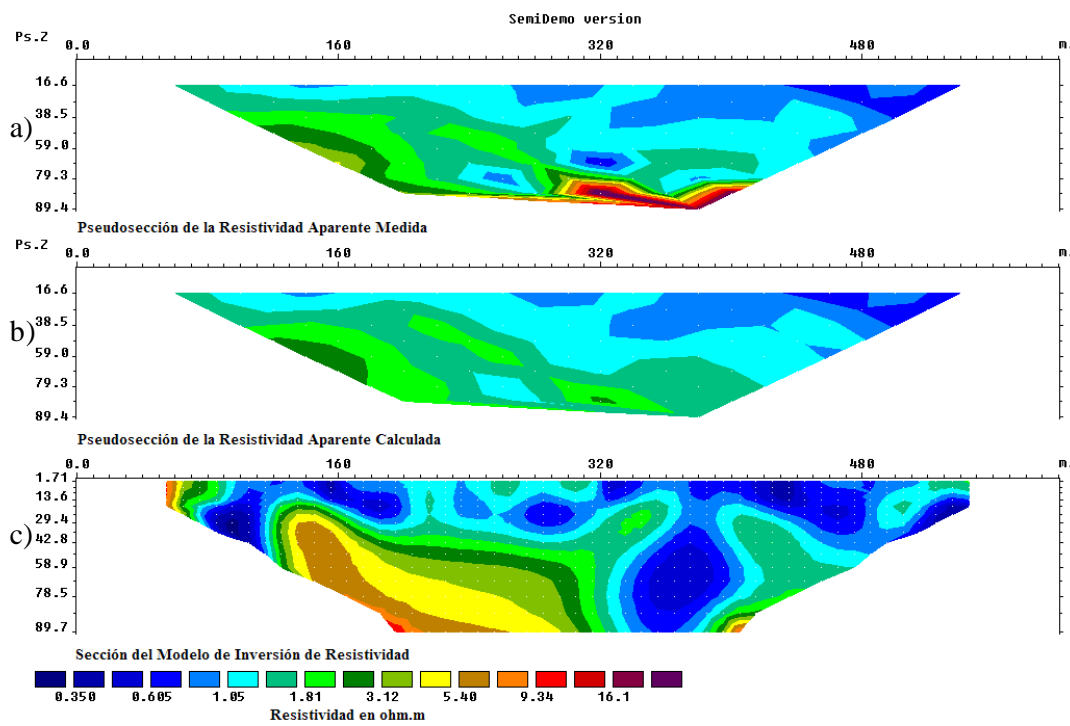


Fig. 33. Sección de Resistividad dada por la inversión del programa RES2DINV

La imagen eléctrica se obtuvo con 5 iteraciones y un error de 16.6% (Fig. 33c), el perfil se caracteriza por tener las resistividades más bajas, esto se debe a la influencia del agua de mar dada la ubicación del perfil (Fig.25).

Las zonas conductoras poseen resistividades de 0.350 ohm-m a 1 ohm-m, que indican las más grandes concentraciones de agua. La profundidad de estas zonas es variable, pues el más conductor se encuentra a unos 35 m de profundidad en los primeros 100 m del tendido, mientras que el perfil nos muestra una concentración de agua más profunda que se extiende más allá de la profundidad obtenida por la tomografía con una resistividad de 1 ohm-m a los 350 m del inicio del perfil.

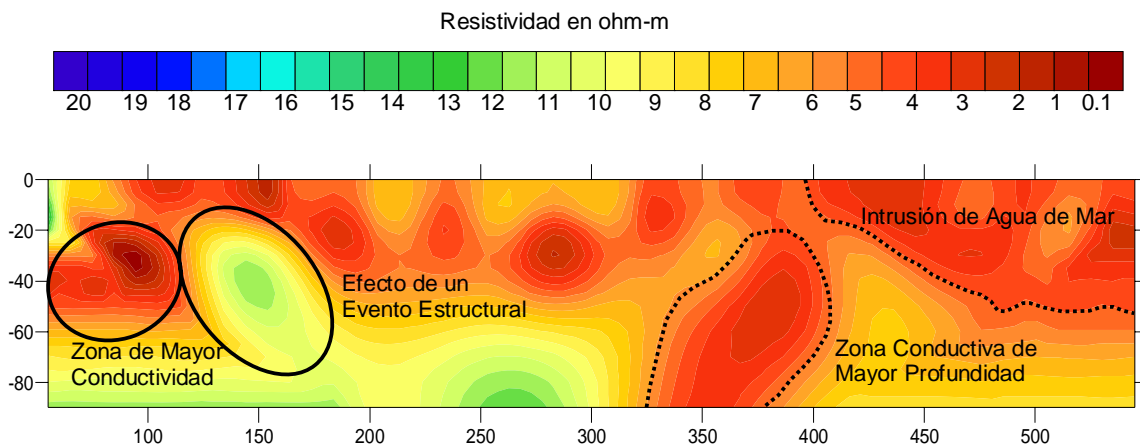


Fig. 34. Sección de Resistividad obtenida con interpolación del programa Surfer.

Para una mejor apreciación del perfil de resistividades desplegamos la imagen con escala vertical lineal en Surfer (Fig.34). Donde se observa claramente el efecto producido por un evento estructural asociado a la falla Agua Blanca en los primeros 150 m del perfil.

A partir de los 400 m se aprecia claramente el efecto que produce la infiltración de agua de mar, ya que esta zona se encuentra más próxima a la Laguna.

5.2.4. Sondeos Eléctricos Verticales

Estos fueron realizados en cada uno de los extremos de la Tomografía 2 con el fin de correlacionar los datos.

5.2.4.1. Interpretación de la curva de Resistividad Aparente obtenida con el SEV 1

Para este sondeo se tomaron 28 aberturas con la finalidad de obtener datos de resistividad aparente para construir la curva de SEV y la profundidad alcanzada fue de 160 [m], con un $AB/2 = 1$ m mínima y una abertura máxima de 500m.

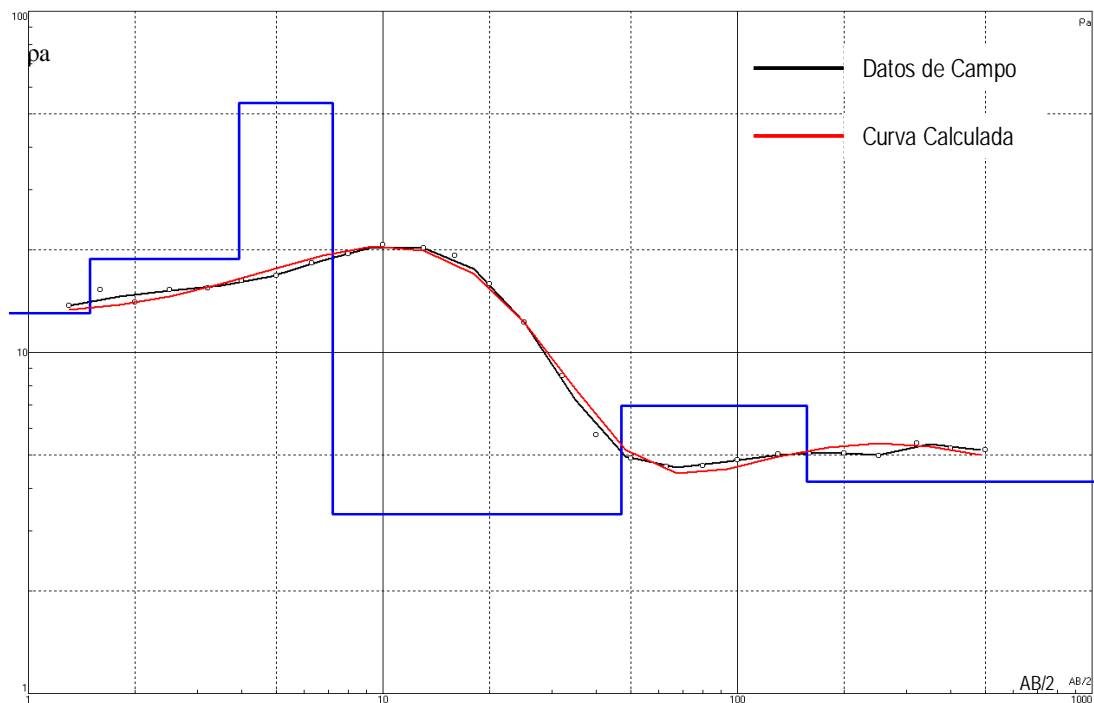


Fig. 35. Perfil del Sondeo 1.

N	Resistividad [Ω m]	Espesor [m]	Profundidad [m]
1	13	1.49	1.49
2	18.8	2.43	3.92
3	53.7	3.31	7.23
4	3.36	39.8	47
5	6.96	110	157
6	4.19		

Tabla 6. Valores de cada una de las capas del perfil 1.

De la comparación de la curva de campo y la calculada, se obtuvo un modelo de ajuste con 6 capas. La primera capa presenta una resistividad de 13 ohm-m con un espesor aproximado de 1.5 m. La siguiente capa es de 18.8 ohm-m y de espesor 2.43 m. Estas capas se tratan de una cobertura superficial.

Una tercera capa se localiza a una profundidad de 7.23 m con una resistividad de 53.7 y de espesor aproximado de 3.3 m nos habla de la litología del lugar, tratándose de rocas sedimentarias.

Las siguientes capas presentan las resistividades mas bajas de 3.36 ohm-m con un espesor de 40 m para la cuarta capa, 6.96 ohm-m con espesor de 110 m, y finalmente la última capa de resistividad 4.19 ohm-m. Este cambio de resistividad se deba a una posible infiltración de agua en los estratos.

5.2.4.2. Interpretación de la curva de Resistividad Aparente obtenida con el SEV 2

Para este sondeo se tomaron 28 aberturas con la finalidad de obtener datos de resistividad aparente para construir la curva de SEV y la profundidad alcanzada fue de 160 [m], aunque se hicieron más repeticiones en este sondeo que en el anterior. La abertura máxima fue de 500 m y la mínima de 1 m.

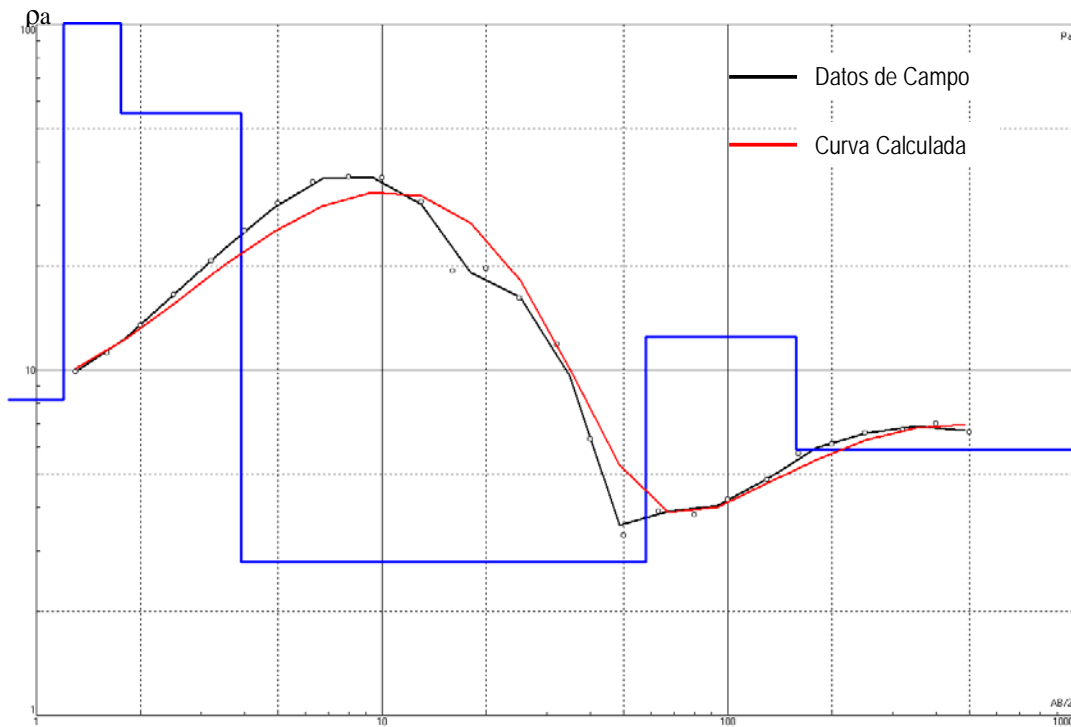


Fig. 36. Perfil del Sondeo 2

N	Resistividad [Ωm]	Espesor [m]	Profundidad [m]
1	8.18	1.2	1.2
2	460	0.56	1.76
3	55.3	2.16	3.92
4	2.79	53.9	57.8
5	12.5	99.8	158
6	5.91		

Tabla 7. Valores del perfil 2

Con los datos de campo y la curva calculada se presento un modelo de 6 capas. De este sondeo podemos observar una capa de suelo de 1.2 m y de resistividad igual a 8.18 ohm-m.

Como segunda capa presenta de una resistividad muy grande de 460 ohm-m con un espesor de 0.56 m. Esta capa posiblemente se trate de un efecto muy local de lugar, por lo que no se tomara en cuenta en la interpretación.

La tercera capa de resistividad igual a 55.3 ohm-m a una profundidad aproximada de 4 m, con un espesor de 2.16 m. Esta capa es la misma que se presenta en el Sondeo 1.

La cuarta capa posee la resistividad mas baja del sondeo igual a 2.79 ohm-m con un espesor de 53.9 m. Esta es la zona se asocia a las mayor concentración de agua, que relacionadas con la información geoquímica, se trata de agua termal.

Las siguientes capas de resistividades de 12.5 ohm-m con espesor de 100 m aproximadamente, y la última capa de 5.91 ohm-m, se correlacionan con la quinta y sexta capa del Sondeo 1, y esto posiblemente se deba a infiltraciones de agua en los estratos.

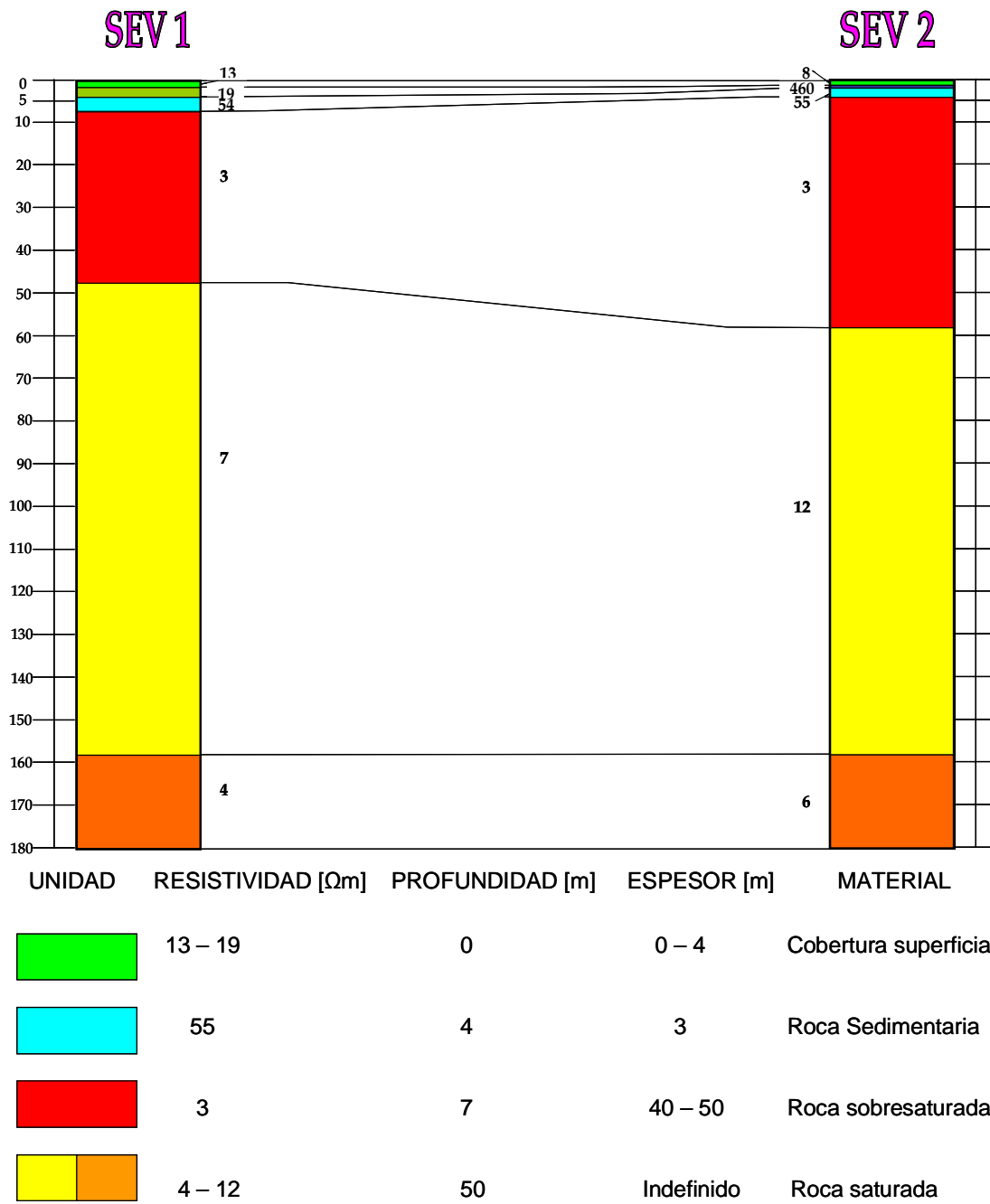


Fig. 37. Diagrama de resistividad.

Basados en la interpretación de las tres tomografías, los dos sondeos eléctricos verticales la información geológica y la información de los estudios geoquímico-térmicos, podemos proponer el siguiente esquema:



En la Fig. 38 observamos un alineamiento de las anomalías conductoras y de los manantiales de alta temperatura. Basados en los resultados del estudio, la zona con mayor potencial geotérmico se localiza a una profundidad de 30 a 70 m.

CONCLUSIONES

El área de Punta Banda es una zona caracterizada por sus sistemas hidrotermales someros asociados con la falla activa de Agua Blanca. Existen manantiales termales a lo largo de la costa de Punta Banda y la barra El Estero, los cuales poseen poca profundidad y temperatura media mayor a 50°C.

El presente estudio fue realizado con la finalidad de determinar las zonas potenciales para la existencia de manantiales termales, donde se detectaron las mayores concentraciones de aguas termales del área, en base a tomografías y sondeos eléctricos verticales.

Las imágenes eléctricas de resistividad obtenidas con los programas RES2DINV e IPI2WIN para tomografías correlacionadas con los sondeos eléctricos verticales respectivos, definen las zonas de interés termal, las cuales se encuentran a una profundidad somera de 20 m a 70 m aproximadamente; que probablemente están relacionadas con la Falla Agua Blanca. Los estudios de temperatura realizados en el área muestran temperaturas promedio de alrededor de 57°C.

De estas imágenes resistivas obtenemos las 6 anomalías mostradas en la Fig. 38, de donde se puede concluir que existen alineamientos de esas anomalías ligados a la geología estructural de la zona, posiblemente fracturas transversales a la Falla Agua Blanca. Además dichas anomalías también siguen los mismos alineamientos con las manifestaciones hidrotermales superficiales de la zona.

La tomografía 3 (Fig. 34) es la que presenta una mayor infiltración de agua de salina, pero dada la alineación y la profundidad a la que se encuentra la zona conductora, que se encuentra en los primeros 100 m del perfil, se puede decir que se trata de la misma zona termal presente en los otros perfiles.

REFERENCIAS

Aguayo J.E., Trápaga R., 1996. Geodinámica de México y Minerales del mar. Fondo de Cultura Económica, México, p. 14 – 24

Baker, R.D., 1992. A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. First Break, v. 10 - 2, p. 53-62

Barragán Chang E., 2002. Análisis y Evaluación de la Salinidad en la zona de Taura. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

Beltrán Abaunza J. M., Quintanilla Montoya A.L., 2001. Calculated heat flow for the Ensenada region, Baja California, México. Ciencias Marinas, diciembre, v.27 – 4, p. 619-634

Canet C., Prol Ledesma R.M., 2006. Procesos de Mineralización en manantiales hidrotermales submarinos someros, Ejemplos en México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo 58, vol. Conmemorativo del centenario – 1, p. 83-102

Cruz Castillo M., 2002. Catálogo de Fallas regionales activas en el Norte de Baja California, México. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, abril, p. 37-42

Comisión Nacional del Agua, abril 1992. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Ojos Negros, Estado de Baja California

Comisión Nacional del Agua, abril 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero de Ojos Negros, Estado de Baja California.

Fabriol H., Martínez M., Vázquez R., 1982. Mediciones gravimétricas y telúricas en el valle de Mandadero, Ensenada, Baja California. Geofísica Internacional, v. 21, p. 41-55

González- Fernández A., Martín Atienza B., Paz López S., 2000. Identificación de fallamiento en la Península de Punta Banda, B.C., a partir de datos de topografía, magnetometría y gravimetría. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, v. 20 – 2, p. 98-106

Gastil, R.G., Phillips, R.P. and Allison, E.C., 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California, Mexico. Geological Society of America Memoir 140, p. 170

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) www.inegi.gob.mx (2 de julio de 2008)

Kaufman A.A., Keller G.V., 1983. Frequency and Transient Soundings. Amsterdam: Elsevier.

Keller G.V., Frischknecht F.C., 1966. Electrical Method in Geophysical Prospecting. Pergamon Press Inc. Oxford

Koefoed O., 1979. Geosounding Principles 1: Resistivity Sounding Measurement. Amsterdam: Elsevier Scientific

Lerman A., 1988. Geochemical Processes Water and Sediment Environments Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida

Loke M.H., Baker R.D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosection. Geophysics, v. 60, p. 1682-1690

Loke M.H., Baker R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, v. 44, p. 131-152

López Ramos E., 1985. Geología de México. CONCACYT. Tomo II, tercera edición, México, D.F.

Orellana E., 1972. Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo, segunda edición, Madrid, España, p. 24 – 72

Pérez Flores M.A., Suárez Vidal F., Gallardo Delgado L.A., González Fernández A., Vázquez R., 2004. Structural pattern of the Todos Santos Coastal Plain based on Geophysical Data. Ciencias Marinas, junio, v. 30 – 2, p. 349-364

Prol Ledesma R.M., 2008. Comunicación personal.

Ravelo Matos D.J., 2007. Inversión e Interpretación de datos de Resistividad aparente en 2D adquiridos en Relieve Topográfico. Tesis de Licenciatura, Universidad Simón Bolívar, Sartenejal, Venezuela.

Roy A., Apparao A., 1975. Depth of investigation in direct current methods. Geophysics, v. 36 – 5, p. 943 – 958

Suárez Arriaga M.C., 2004. Evaluación del potencial, biogénesis y características esenciales de los sistemas geotérmicos submarinos en México, Norte de la costa Mexicana del Océano Pacífico y golfo de California. Geotermia, Comisión Federal de Electricidad, v. 17 – 1, p. 31-44

Servicio Geológico Mexicano, 1997. Carta Geológica-Minera de Ensenada, Baja California, H11-2, Esc. 1:250000

Sumanovac F., Dominkovic A.S., 2007. Determination of Resolution limits of Electrical Tomography on the Block Model in a homogenous environment by means of electrical modeling. Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik, v. 19, p. 47-56

Tutorial RES2DINV ver. 3.55. Geotomo Software, enero 2006.

Urbieta Gómez J., 2001. La Tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Vidal M.V., Vidal F. V., Isaacs J.D., Ypung D.R., 1978. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California. Journal Geophysical Research, abril, v. 83 - B4, p. 1757-1774

Vidal M.V., Vidal F.V., 1981. Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California 2. Evolutionary History and Isotope Geochemistry. Journal Geophysical Research, octubre, v. 83 - B10, p. 9451-9468

Gobierno del Estado de Baja California

<http://www.bajacalifornia.gob.mx/ecologia/nuestrot/hidrologia.htm> (15 de Septiembre de 2008)

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

<http://www.cicese.mx/tallerjovenes/Ensenada/Ensenada.html> (17 de Septiembre de 2008)

ANEXO

TOMOGRFÍA 1

Levantamiento terreno Pavlov

Ubicación c1-c2 0-40

LA JOYA Dirección de línea E-W

Coordenadas 532266 3508738

Final de línea 531799 3508768

0-40						
ubic. dipolo	No	K [m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
80-120	1	754	22.7	1097	15.6023701	15.6282929
			22.9	1103	15.6542158	
120-160	2	3015.9	8.28	210	11.8912629	13.2312326
			12.9	2670	14.5712022	
160-200	3	7539.8	1.49	1539	7.29974139	7.08511754
			1.47	1605	6.90561121	
			2.02	2160	7.05	
200-240	4	15079.6	3.52	2150	24.6884614	23.095427
			3.08	2160	21.5023926	
40-80						
120-160	1	754	34.3	2590	9.98540541	3.34333333
			34.6	2620	9.95740458	
			35	2630	10.03	
160-200	2	3015.9	4.99	3070	4.90206547	2.45776266
			5.02	3080	4.91552532	
200-240	3	7539.8	2.28	3090	5.56334757	5.51789153
			2.25	3100	5.47243548	
240-280	4	15079.6	1.65	3130	7.9493099	7.99588162
			1.68	3150	8.04245333	
280-320	5	26389.4	0.899	2700	8.78669281	8.83377681
			0.912	2710	8.88086081	
320-360	6	42223	0.718	3160	9.59370696	10.4643256
			0.851	3170	11.3349442	
360-400	7	63334.5	0.61	3150	12.2647762	12.3155189
			0.617	3160	12.3662616	
80-120						
160-200	1	754	18.8	3300	4.29551515	4.30693939
			18.9	3300	4.31836364	
200-240	2	3015.9	6.01	3280	5.52608506	5.5047698
			6	3300	5.48345455	
240-280	3	7539.8	2.42	3260	5.59702945	5.60295253
			2.44	3280	5.60887561	
280-320	4	15079.6	1.72	3250	7.98058831	7.85214293
			1.68	3280	7.72369756	

ubic. dipolo	No	K [m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
320-360	5	26389.4	1.16	3620	8.45627182	9.05461828
			1.39	3800	9.65296474	
360-400	6	42223	0.718	3260	9.29942147	9.32393887
			0.724	3270	9.34845627	
400-440	7	63334.5	0.547	3260	10.6269851	10.6204201
			0.548	3270	10.613855	
120-160						
200-240	1	754	18.2	3620	3.79	3.79030055
			18.4	3660	3.79060109	
240-280	2	3015.9	4.35	3640	3.60416621	3.61491917
			4.4	3660	3.62567213	
280-320	3	7539.8	2.47	3710	5.01975903	5.03328032
			2.49	3720	5.04680161	
320-360	4	15079.6	1.22	4100	4.48710049	5.14760098
			1.43	3670	5.87570245	
			1.24	3680	5.08	
360-400	5	26389.4	0.891	3670	6.40679984	6.38163283
			0.884	3670	6.35646583	
400-440	6	42223	0.75	3730	8.48987936	9.33687328
			0.89	3690	10.1838672	
440-480	7	63334.5	0.59	3710	10.0720633	10.0003141
			0.591	3770	9.92856485	
160-200						
240-280	1	754	15.9	3120	3.8425	3.8425
			15.9	3120	3.8425	
280-320	2	3015.9	3.91	3050	3.86628492	3.89446305
			3.98	3060	3.92264118	
320-360	3	7539.8	1.5	3050	3.70809836	3.73899918
			1.56	3120	3.7699	
360-400	4	15079.6	0.879	3060	4.33168902	4.32709011
			0.88	3070	4.32249121	
400-440	5	26389.4	0.615	3770	4.30490212	4.29571715
			0.614	3780	4.28653217	
440-480	6	42223	1.11	6840	6.85197807	7.03113665
			1.18	6910	7.21029522	
200-240						
280-320	1	754	38.8	3740	7.82224599	7.83313912
			38.7	3720	7.84403226	
320-360	2	3015.9	7.36	4470	4.96577718	5.05448189
			7.64	4480	5.14318661	
360-400	3	7539.8	3.4	4490	5.70942539	5.68632647
			3.38	4500	5.66322756	
400-440	4	15079.6	1.16	3780	4.62760212	4.51959361
			1.1	3760	4.41158511	
440-480	5	26389.4	0.51	4520	2.97756504	2.48571541
			0.34	4500	1.99386578	
240-280						
320-360	1	754	39.1	4320	6.82439815	6.86657117
			39.4	4300	6.90874419	

ubic. dipolo	No	K [m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
320-360	1	754	39.1	4320	6.82439815	6.86657117
			39.4	4300	6.90874419	
360-400	2	3015.9	7.74	4320	5.4034875	5.40904003
			7.72	4300	5.41459256	
400-440	3	7539.8	3.82	4310	6.68260696	5.95449441
			3.16	4300	5.54087628	
			3.23	4320	5.64	
440-480	4	15079.6	3.56	4300	12.484506	12.390361
			3.49	4280	12.2962159	
280-320						
360-400	1	754	32.6	2940	8.36068027	8.36782336
			33.1	2980	8.37496644	
400-440	2	3015.9	9.8	3600	8.20995	8.20626758
			9.9	3640	8.20258516	
440-480	3	7539.8	4.77	3480	10.3347259	10.1470876
			4.61	3490	9.95944928	
320-360						
400-440	1	754	31.1	3370	6.95827893	6.94887398
			31.2	3390	6.93946903	
440-480	2	3015.9	14.7	3360	13.1945625	12.9582503
			14.3	3390	12.7219381	
360-400						
440-480	1	754	46.5	3780	9.27539683	9.28835458
			47	3810	9.30131234	

TOMOGRAFÍA 2

Levantamiento Carretera- terreno Pavlov

Ubicación c1-c2 0-40

La Joya

Dirección de línea E-W sobre la carretera hacia el oeste

Coordenadas inicio UTM 532428 3508775

Fin de línea 531989 3508825

0-40						
ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
80-120	1	754	6.35	1152	4.15616319	4.16925347
			6.39	1152	4.18234375	
120-160	2	3015.9	4.36	2740	4.79902336	4.75299079
			4.37	2800	4.70695821	
160-200	3	7539.8	0.751	1270	4.45857465	4.44829823
			0.734	1247	4.43802181	
200-240	4	15079.6	1.1	2910	5.70019244	5.72240098
			1.12	2940	5.74460952	
240-280	5	26389.4	0.194	1220	4.19634721	3.59954779
			0.193	1206	4.22317927	
			0.203	1204	4.44937558	
			0.234	1204	5.12883688	
280-320	6	42223	0.255	2830	3.80454594	3.82237167
			0.233	2550	3.85802314	
			0.255	2830	3.80454594	
320-360	7	63334.5	0.19	2550	4.71904118	4.76871529
			0.186	2550	4.61969294	
			0.2	2550	4.96741176	
40-80						
120-160	1	754	18	3210	4.22803738	4.21629283
			17.9	3210	4.20454829	
160-200	2	3015.9	4.81	3210	4.51915234	4.5520068
			4.88	3210	4.58491963	
			4.86	3220	4.55194845	
200-240	3	7539.8	2.61	3200	6.14964938	6.15553984
			2.63	3200	6.19677313	
			2.61	3200	6.14964938	
			2.6	3200	6.1260875	
240-280	4	15079.6	1.08	2970	5.48349091	5.438054
			0.99	2780	5.37007338	
			1.17	3210	5.4963028	
			1.15	3210	5.40234891	

ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
280-320	5	26389.4	0.63	3560	4.67003427	4.63560615
			0.629	3560	4.66262152	
			0.624	3600	4.57416267	
320-360	6	42223	0.589	3560	6.98577163	6.93188491
			0.584	3560	6.92646966	
			0.582	3570	6.88341345	
360-400	7	63334.5	0.379	3610	6.64924529	6.73170295
			0.375	3610	6.57906856	
			0.396	3600	6.966795	
80-120						
160-200	1	754	17.3	3870	3.37059432	3.35555032
			28	6320	3.34050633	
200-240	2	3015.9	10.6	6340	5.04235647	5.01463886
			10.5	6350	4.98692126	
240-280	3	7539.8	3.79	6350	4.5001326	4.50252227
			3.8	6360	4.50491195	
280-320	4	15079.6	1.7	6370	4.02438305	4.04807494
			1.71	6380	4.04171097	
			1.72	6360	4.07813082	
320-360	5	26389.4	1.31	6380	5.41851317	5.74465705
			1.47	6390	6.07080094	
360-400	6	42223	0.481	4460	4.55364641	4.71058326
			0.489	4470	4.61902617	
			0.525	4470	4.95907718	
400-440	7	63334.5	0.658	6450	6.46110093	6.36290791
			0.638	6450	6.26471488	
120-160						
200-240	1	754	20.5	3680	4.20027174	4.20479712
			20.6	3690	4.20932249	
240-280	2	3015.9	5.68	3690	4.64236098	4.79356463
			6.05	3690	4.94476829	
280-320	3	7539.8	1.71	3230	3.99165882	3.97386336
			1.7	3240	3.9560679	
320-360	4	15079.6	1.04	2630	5.96303574	5.80751341
			1.01	2640	5.76908939	
			1	2650	5.69041509	
360-400	5	26389.4	0.756	3670	5.43607259	5.44326316
			0.758	3670	5.45045373	
			0.757	3670	5.44326316	
400-440	6	42223	0.746	4660	6.75930429	6.820828
			0.761	4670	6.88045032	
			0.753	4660	6.8227294	
440-480	7	63334.5	0.466	3650	8.0859937	8.18073421
			0.473	3620	8.27547472	
160-200						
240-280	1	754	16.4	3790	3.26269129	3.2541278
			16.4	3810	3.2455643	

ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
280-320	2	3015.9	2.2	2760	2.40397826	2.43675978
			2.26	2760	2.4695413	
320-360	3	7539.8	1.7	2760	4.64407971	4.60310254
			1.67	2760	4.56212536	
360-400	4	15079.6	1.44	6270	3.46325742	3.38435287
			1.37	6250	3.30544832	
400-440	5	26389.4	0.676	3370	5.29354136	5.30127965
			0.682	3390	5.30901794	
440-480	6	42223	0.42	2790	6.35615054	6.54984002
			0.444	2780	6.7435295	
480-520	7	63334.5	0.543	6310	5.45017964	5.74604494
			0.601	6300	6.04191024	
200-240						
280-320	1	754	9.16	2880	2.39813889	2.43668881
			7.47	2300	2.44886087	
			9.8	3000	2.46306667	
320-360	2	3015.9	3.61	3020	3.60509901	3.5842198
			3.58	3030	3.56334059	
360-400	3	7539.8	1.28	2460	3.92314797	3.90756213
			1.28	2500	3.8603776	
			1.28	2450	3.93916082	
400-440	4	15079.6	1.19	3070	5.84518697	5.69802738
			1.15	3100	5.59404516	
			1.17	3120	5.65485	
440-480	5	26389.4	0.646	3100	5.49921045	5.46156052
			0.631	3100	5.37151981	
			0.654	3130	5.51395131	
480-520	6	42223	0.611	3490	7.39204957	7.30830411
			0.604	3530	7.22455864	
520-560	7	63334.5	0.349	3250	6.80115092	6.53815882
			0.323	3260	6.27516672	
560-600	8	90477.9	0.34	3260	9.4363454	9.47797633
			0.343	3260	9.51960727	
240-280						
320-360	1	754	8.22	2390	2.59325523	2.59325523
360-400	2	3015.9	2.6	2390	3.2808954	3.26827657
			2.58	2390	3.25565774	
400-440	3	7539.8	1.28	2580	3.74067597	3.74089905
			1.3	2620	3.74112214	
440-480	4	15079.6	0.92	3610	3.84300055	3.67494214
			0.9	3870	3.50688372	
480-520	5	26389.4	0.447	2260	5.21949637	5.09836882
			0.447	2370	4.97724127	
520-560	6	42223	0.294	2600	4.77444692	4.86798904
			0.401	3060	5.53314477	
			0.406	3990	4.29637544	
560-600	7	63334.5	0.22	2060	6.76387864	6.68568608
			0.217	2080	6.60749351	

ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
600-640	8	90477.9	0.159	1713	8.39812382	7.97784479
			0.142	1700	7.55756576	
280-320						
360-400	1	754	9.91	2440	3.06235246	3.06841296
			9.99	2450	3.07447347	
400-440	2	3015.9	2.29	2450	2.81894327	2.83160334
			2.32	2460	2.84426341	
440-480	3	7539.8	1.01	2460	3.09560894	3.09560894
			1.01	2460	3.09560894	
480-520	4	15079.6	0.571	2450	3.51447004	3.53094207
			0.574	2440	3.5474141	
520-560	5	26389.4	0.361	2470	3.85691231	3.84866046
			0.358	2460	3.84040862	
560-600	6	42223	0.565	4600	5.18608587	5.19780714
			0.343	2780	5.20952842	
600-640	7	63334.5	0.206	2240	5.82451205	5.95787682
			0.219	2240	6.19207835	
			0.209	2260	5.85704004	
640-680	8	90477.9	0.172	2520	6.17547571	6.15116282
			0.172	2540	6.12684992	
320-360						
400-440	1	754	14.8	3040	3.67078947	3.68343395
			15	3060	3.69607843	
440-480	2	3015.9	3.48	3040	3.45241184	3.47303909
			3.51	3030	3.49366634	
480-520	3	7539.8	1.56	3030	3.88187723	3.90029453
			1.58	3040	3.91871184	
520-560	4	15079.6	0.85	3030	4.23025083	4.22329318
			0.85	3040	4.21633553	
560-600	5	26389.4	0.566	2620	5.70091618	5.72430374
			0.575	2640	5.74769129	
600-640	6	42223	0.408	2650	6.50074868	6.46508002
			0.402	2640	6.42941136	
640-680	7	63334.5	0.354	3770	5.94705915	6.09025365
			0.374	3800	6.23344816	
680-720	8	90477.9	0.171	3030	5.10617851	5.23447073
			0.179	3020	5.36276295	
360-400						
440-480	1	754	21.6	3130	5.20332268	5.20704351
			21.7	3140	5.21076433	
480-520	2	3015.9	3.72	3130	3.58439233	3.58737474
			3.75	3150	3.59035714	
520-560	3	7539.8	1.59	3140	3.8179242	3.80591815
			1.58	3140	3.7939121	
560-600	4	15079.6	1.12	3160	5.34466835	5.38380799
			1.14	3170	5.42294763	
600-640	5	26389.4	0.74	3170	6.16030158	6.21597981
			0.751	3160	6.27165804	

ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
640-680	6	42223	0.491	3180	6.51933742	6.53925393
			0.494	3180	6.55917044	
680-720	7	63334.5	0.316	3170	6.31347066	6.23411699
			0.31	3190	6.15476332	
720-760	8	90477.9	0.428	3180	12.1775287	11.7577703
			0.401	3200	11.3380118	
400-440						
480-520	1	754	15.2	2460	4.65886179	4.63416774
			15.1	2470	4.60947368	
520-560	2	3015.9	5.73	4090	4.22520954	4.17292622
			5.81	4230	4.14240638	
520-560	2	3015.9	3.62	2630	4.15116274	
560-600	3	7539.8	2.03	2660	5.75405789	5.7619633
			2.01	2630	5.76235665	
			4.53	5920	5.76947534	
600-640	4	15079.6	2.6	5990	6.54540234	6.51831044
			2.6	6040	6.49121854	
640-680	5	26389.4	1.51	6011	6.62917884	6.65112976
			1.52	6011	6.67308069	
680-720	6	42223	0.709	4100	7.30148951	7.44796363
			0.812	4100	8.36221366	
			0.761	4810	6.68018773	
720-760	7	63334.5	0.799	6220	8.135734	8.15233714
			0.81	6280	8.16894029	
760-800	8	90477.9	0.405	4900	7.47827541	7.78097832
			0.436	4880	8.08368123	
440-480						
520-560	1	754	14.2	2830	3.78332155	3.73003534
			13.8	2830	3.67674912	
560-600	2	3015.9	5	2840	5.3096831	5.277825
			4.94	2840	5.2459669	
600-640	3	7539.8	2.23	2830	5.94125583	5.91752158
			2.22	2840	5.89378732	
640-680	4	15079.6	2.51	6360	5.95122579	5.94655449
			2.51	6370	5.9418832	
680-720	5	26389.4	1.44	6300	6.03186286	5.96655726
			1.42	6350	5.90125165	
720-760	6	42223	0.96	4910	8.25541344	8.04841386
			0.91	4900	7.84141429	
760-800	7	63334.5	0.81	6310	8.13010222	8.38788206
			0.86	6300	8.6456619	
480-520						
560-600	1	754	20.7	3000	5.2026	5.19003333
			20.6	3000	5.17746667	
600-640	2	3015.9	6.4	3000	6.43392	6.33617322
			6.24	3010	6.25223123	
			6.31	3010	6.32236844	
640-680	3	7539.8	2.36	2460	7.23330407	7.05077147
			2.25	2470	6.86823887	
680-720	4	15079.6			No Entra	

520-560						
ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ω m]	Meanres [Ω m]
600-640	1	754	26.6	3810	5.26414698	5.24435696
			26.4	3810	5.22456693	
640-680	2	3015.9	6.96	3810	5.50936063	5.48957126
			6.91	3810	5.46978189	
680-720	3	7539.8	3.92	3810	7.75748451	7.73792936
			3.89	3800	7.71837421	
720-760	4	15079.6	1.11	3170	5.28023849	5.16924248
			1.07	3170	5.08995962	
			1.08	3170	5.13752934	
760-800	5	26389.4	1.38	3170	11.48813	11.2938862
			1.34	3170	11.1551407	
			1.35	3170	11.238388	
560-600						
640-680	1	754	32.7	4590	5.37163399	5.36926678
			32.6	4580	5.36689956	
680-720	2	3015.9	10.6	4570	6.99530416	7.01067845
			10.6	4550	7.02605275	
720-760	3	7539.8	5.52	4550	9.14718593	9.20141332
			5.61	4570	9.2556407	
760-800	4	15079.6	2.88	4560	9.52395789	9.34564591
			2.76	4540	9.16733392	
600-640						
680-720	1	754	49.9	3830	9.82365535	9.90182768
			49.9	3770	9.98	
720-760	2	3015.9	10.2	3410	9.02116716	8.99008211
			10.1	3400	8.95899706	
760-800	3	7539.8	4.55	3410	10.060437	9.71503573
			4.25	3420	9.3696345	
640-680						
720-760	1	754	24	3370	5.36973294	5.37127365
			23.8	3340	5.37281437	
760-800	2	3015.9	16	6730	7.17004458	7.42261959
			8.5	3340	7.67519461	
680-720						
760-800	1	754	36.7	3890	7.11357326	7.10388175
			36.6	3890	7.09419023	

TOMOGRAFÍA 3

Levantamiento de la calle de Novelo

Ubicación c1-c2 0-40

LA JOYA

Dirección de línea E-W casi paralela a la línea de costa

Coordenadas inicio UTM 532142 3508828

Fin de línea 532568 3509194

0-40						
ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
80-120	1	754	4.02	1410	2.14970213	2.15688319
			4.11	1432	2.16406425	
120-160	2	3015.9	1.74	2500	2.0990664	2.03031369
			1.6	2460	1.96156098	
160-200	3	7539.8	0.847	2630	2.42821696	2.44117397
			0.664	2040	2.45413098	
200-240	4	15079.6	0.623	2950	3.18460705	3.32366501
			0.558	2430	3.46272296	
240-280	5	26389.4	0.398	2630	3.99352897	3.97100907
			0.398	2660	3.94848917	
280-320	6	42223	0.439	3790	4.89073799	4.69884372
			0.38	3560	4.50694944	
320-360	7	63334.5	0.196	4010	3.09565137	3.11551133
			0.2	4040	3.13537129	
360-400	8	90477.9	0.17	4110	3.74239489	3.72237966
			0.169	4130	3.70236443	
40-80						
120-160	1	754	13	6160	1.59123377	1.62270872
			12.9	5880	1.65418367	
160-200	2	3015.9	3.88	5970	1.96008241	1.92040556
			3.91	6270	1.88072871	
200-240	3	7539.8	1.65	4900	2.53891224	2.53883422
			1.66	4930	2.53875619	
240-280	4	15079.6	0.946	4930	2.8935703	2.83439834
			0.957	5200	2.77522638	
280-320	5	26389.4	0.635	5890	2.84503718	2.92718545
			0.661	5920	2.94651916	
			0.681	6000	2.99	
320-360	6	42223	0.377	6180	2.57573964	2.52108204
			0.361	6180	2.46642443	
360-400	7	63334.5	0.174	5930	1.85838162	2.13018538
			0.234	6170	2.40198914	
400-440	8	90477.9	0.189	5730	2.98434958	2.87704061
			0.18	5880	2.76973163	

80-120						
ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
160-200	1	754	11	6280	1.32070064	1.32634401
			11.2	6340	1.33198738	
200-240	2	3015.9	3.89	6630	1.76950995	1.82545106
			3.98	6380	1.88139216	
240-280	3	7539.8	1.86	6000	2.337338	2.33198798
			1.87	6060	2.32663795	
280-320	4	15079.6	0.907	6380	2.14376132	2.15469929
			0.922	6420	2.16563726	
320-360	5	26389.4	0.475	5930	2.11382209	1.95127403
			0.442	6430	1.81	
			0.447	6090	1.93	
360-400	6	42223	0.258	6000	1.815589	1.77610844
			0.261	6360	1.73273632	
			0.265	6270	1.78	
400-440	7	63334.5	0.104	5810	1.13369845	1.13939311
			0.113	6250	1.14508776	
400-440	8	90477.9	0.111	6170	1.62772235	1.62772235
120-160						
200-240	1	754	5.63	2950	1.43	1.43577288
			5.64	2950	1.44154576	
240-280	2	3015.9	2.37	3570	2.0021521	1.95130809
			2.3	3570	1.94301681	
			5.11	7970	1.93365734	
			5.11	8000	1.92640613	
280-320	3	7539.8	2.22	7950	2.10545358	2.14538288
			2.31	7970	2.18531217	
320-360	4	15079.6	1.22	7950	2.31410214	2.47216922
			1.45	7950	2.7503673	
			1.24	7950	2.35203824	
360-400	5	26389.4	0.674	7930	2.24293261	2.52021522
			0.794	7940	2.63894	
			0.807	7950	2.67877306	
400-440	6	42223	0.482	7850	2.59254599	2.41636187
			0.44	7920	2.34572222	
			0.434	7930	2.3108174	
440-480	7	63334.5	0.243	3550	4.33529113	4.20148585
			0.228	3550	4.06768056	
480-520	8	90477.9	2.36	7850	27.2009992	27.4784498
			2.42	7840	27.9281273	
			1.91	6600	26.1837559	
			2.08	6580	28.6009167	
160-200						
240-280	1	754	2.86	1540	1.40028571	1.42231818
			2.95	1540	1.44435065	
280-320	2	3015.9	2.61	4940	1.59342085	1.56878083
			2.56	5000	1.5441408	

ubic. dipolo	No	K(m)	ΔV (mV)	I(Ω m)	Resistividad	Meanres
320-360	3	7539.8	1	5010	1.5049501	1.51847067
			1.02	5020	1.53199124	
360-400	4	15079.6	0.657	5090	1.94642381	1.94599394
			0.658	5100	1.94556408	
400-440	5	26389.4	0.286	5140	1.46835961	1.48743064
			0.294	5150	1.50650167	
440-480	6	42223	0.113	5320	0.89684192	0.86774085
			0.104	5320	0.82541203	
			0.111	5320	0.88096861	
480-520	7	63334.5	0.176	5340	2.08742921	2.17175084
			0.19	5330	2.25770263	
			0.184	5370	2.17012067	
520-560	8	90477.9	0.101	5350	1.70808746	1.75882273
			0.107	5350	1.809558	
560-600	9	124407.069	0.65	5170	15.6411209	17.4478632
			0.7	5220	16.6829403	
			0.84	5220	20.0195283	
200-240						
280-320	1	754	7.4	3870	1.44175711	1.44175711
320-360	2	3015.9	1.75	3900	1.35328846	1.35328846
360-400	3	7539.8	0.932	3880	1.8111066	1.8111066
400-440	4	15079.6	0.392	3950	1.49650714	1.47938569
			0.384	3960	1.46226424	
440-480	5	26389.4	0.259	3830	1.78455734	1.74321624
			0.247	3830	1.70187514	
480-520	6	42223	0.192	3760	2.15606809	2.13360904
			0.189	3780	2.11115	
520-560	7	63334.5	0.091	3070	1.87734186	1.31379891
			0.108	3670	1.86379455	
			0.115	3670	0.20026031	
560-600	8	90477.9	0.6	3100	17.5118516	20.4304935
			0.8	3100	23.3491355	
240-280						
320-360	1	754	6.83	4500	1.14440444	1.14440444
360-400	2	3015.9	2.28	4560	1.50795	1.50795
400-440	3	7539.8	0.742	4560	1.22687096	1.22687096
440-480	4	15079.6	0.488	4880	1.50796	1.52347399
			0.496	4860	1.53898798	
480-520	5	26389.4	0.327	4830	1.78661155	1.78661155
520-560	6	42223	0.238	4840	2.07625496	1.96926478
			0.217	4920	1.86227459	
560-600	7	63334.5	0.135	5030	1.6998325	1.6998325
280-320						
360-400	1	754	11.7	5310	1.66135593	1.65688423
			11.9	5430	1.65241252	
400-440	2	3015.9	2.33	5390	1.30371929	1.30371929
440-480	3	7539.8	1.002	5440	1.38876463	1.38876463
480-520	4	15079.6	0.568	5420	1.58029756	1.58029756
520-560	5	26389.4	0.351	5440	1.70269842	1.70269842
560-600	6	42223	0.2	5260	1.60543726	1.55318129
			0.198	5570	1.50092531	

320-360						
ubic. dipolo	No	K[m]	ΔV [mV]	I [mA]	Resistividad [Ωm]	Meanres [Ωm]
400-440	1	754	6.33	4060	1.17557143	1.17835714
			6.36	4060	1.18114286	
440-480	2	3015.9	1.63	4060	1.210817	1.2093295
			1.63	4070	1.20784201	
480-520	3	7539.8	0.737	4060	1.36867798	1.36774943
			0.736	4060	1.36682089	
520-560	4	15079.6	0.404	4070	1.49684482	1.49313975
			0.402	4070	1.48943469	
560-600	5	26389.4	0.446	9100	1.29337059	1.2795664
			0.436	9090	1.2657622	
360-400						
440-480	1	754	6.28	3990	1.18674687	1.18674687
480-520	2	3015.9	1.9	4000	1.4325525	1.4325525
520-560	3	7539.8	0.855	4000	1.61163225	1.61163225
560-600	4	15079.6	0.363	4000	1.3684737	1.3684737
400-440						
480-520	1	754	4.96	4080	0.91662745	0.91662745
520-560	2	3015.9	1.42	4070	1.05223047	1.05223047
560-600	3	7539.8	0.582	4060	1.08082847	1.08082847
440-480						
520-560	1	754	7.01	4150	1.2736241	1.2736241
560-600	2	3015.9	1.37	4140	0.99801522	0.99801522
480-520						
560-600	1	754	4.63	3660	0.9538306	0.9538306

SEV 1

Ubicación LA JOYA

Coordenadas 11R 0531881 3509029

No	AB/2 [m]	MN/2 [m]	K [m]	ΔV [mV]	I [mA]	ρ [$\Omega \cdot m$]	Menares
1	1	0.32	4.4	3570	1327	11.8372268	11.8372268
2	1.3	0.32	7.8	2060	1359	11.8233996	11.8233996
3	1.6	0.32	12.1	1480	1361	13.1579721	13.1579721
4	2	0.32	19.1	993	1671	11.3502693	12.0781407
				881	1314	12.8060122	
5	2.5	0.32	30.2	890	2040	13.1754902	13.1754902
6	3.2	0.32	49.8	454	1697	13.3230407	13.3230407
7	4	0.32	78	338	1884	13.9936306	13.9936306
8	5	0.32	122.2	236	1981	14.5579001	14.5579001
		1	37.7	723	1974	13.8080547	13.8080547
9	6.3	0.32	194.3	144	1774	15.7718151	15.7718151
		1	60.8	433	1739	15.1388154	15.1388154
10	8	1	99	234	1450	15.9765517	15.9765517
11	10	1	155.5	174	1590	17.0169811	17.0169811
12	13	1	263.9	164	2600	16.646	16.646
13	16	1	400.6	100	2510	15.9601594	15.6293316
				97	2540	15.2985039	
		3.2	120.6	351	2500	16.93224	16.93224
14	20	1	626.8	43.3	2040	13.3041373	13.3041373
		3.2	191.3	143	2020	13.5425248	13.5425248
15	25	3.2	301.8	102.7	2920	10.6146781	10.6146781
16	32	3.2	497.6	42.2	2840	7.39391549	7.39391549
17	40	3.2	780.4	14.4	2270	4.95055507	4.95055507
18	50	3.2	1222.1	5.25	1517	4.22941661	4.22941661
		10	377	17.5	1515	4.35478548	4.35478548
19	63	3.2	1943.3	3.28	1595	3.99625329	3.99625329
		10	607.7	10.3	1528	4.09640707	4.09640707
20	80	10	989.6	12	2870	4.13770035	4.13770035
21	100	10	1555.5	4.74	1717	4.29415842	4.29415842
22	130	10	2639	3.31	1958	4.46123085	4.46123085
23	160	10	4006	2.1	1879	4.47716871	4.47716871
		32	1206.4	7.87	1859	5.10724476	5.10724476
24	200	10	6268	1.73	2390	4.53708787	4.53708787
		32	1913.2	6.26	2380	5.03219832	5.03219832
25	250	32	3017.7	3.57	2160	4.9875875	4.97855132
				3.59	2180	4.96951514	
26	320	32	4976.3	1.3	1294	4.99937403	5.42578242
				1.51	1284	5.85219081	
27	400	32	7803.7	1.75	2640	5.1729072	5.22204284
				1.79	2650	5.27117849	
28	500	32	12221.6	1.53	3620	5.16548287	5.18734472
				1.56	3660	5.20920656	

SEV 2

Ubicación LA JOYA

Coordenadas 11R 0532356 3508966

No	AB/2 [m]	MN/2 [m]	K [m]	ΔV [mV]	I [mA]	ρ [$\Omega \cdot m$]	Menares
1	1	0.32	4.4	5080	2350	9.51148936	9.51148936
2	1.3	0.32	7.8	3610	2290	12.2960699	12.2960699
3	1.6	0.32	12.1	2680	2320	13.9775862	13.9775862
4	2	0.32	19.1	1990	2270	16.7440529	16.7440529
5	2.5	0.32	30.2	1510	2220	20.5414414	20.5414414
6	3.2	0.32	49.8	1270	2450	25.8146939	25.8146939
7	4	0.32	78	844	2100	31.3485714	31.3485714
8	5	0.32	122.2	727	2370	37.4849789	37.4849789
		1	37.7	1980	2370	31.4962025	31.4962025
9	6.3	0.32	194.3	651	2890	43.7679239	43.7679239
		1	60.8	147	2470	3.61846154	3.61846154
10	8	1	99	946	2500	37.4616	37.4616
11	10	1	155.5	620	2590	37.2239382	37.2239382
12	13	1	263.9	319	2680	31.4119776	31.8109128
				321	2630	32.2098479	
13	16	1	400.6	136	2730	19.95663	20.0302707
				136	2710	20.1039114	
				3.2	120.6	446	
				457	2760	19.968913	
14	20	1	626.8	92.2	2830	20.4208339	20.4208339
		3.2	191.3	293	2830	19.8059717	19.8059717
15	25	3.2	301.8	155	2870	16.2993031	16.2993031
				155	2870	16.2993031	
16	32	3.2	497.6	70.8	2940	11.9830204	12.0240581
				70.8	2920	12.0650959	
17	40	3.2	780.4	24.7	3020	6.38274172	6.39566225
				24.8	3020	6.40858278	
18	50	3.2	1222.1	8.2	3030	3.30733333	3.3154
				8.24	3030	3.32346667	
				10	377	26.1	
				30	3010	3.75747508	
19	63	3.2	1943.3	3.46	1701	3.95286185	3.96710098
				3.53	1723	3.9813401	
				10	607.7	11.2	
				11.3	1697	4.04655863	
20	80	10	989.6	6.11	1519	3.98055036	4.00275488
				6.41	1576	4.02495939	
21	100	10	1555.5	5.17	1811	4.44060464	4.44060464
22	130	10	2639	2.74	1426	5.07072931	5.07072931
23	160	10	4006	2.89	1907	6.07097011	5.98694284
				2.81	1907	5.90291557	
				32	1206.4	9.1	
				9	1899	5.71753555	

24	200	10	6268	<u>3.44</u>	<u>3290</u>	<u>6.55377508</u>	6.48640561
				3.4	3320	6.41903614	
		32	1913.2	<u>10.45</u>	<u>3270</u>	<u>6.11404893</u>	6.05514886
				10.28	3280	5.99624878	
25	250	32	3017.7	<u>7.55</u>	<u>3470</u>	<u>6.56588905</u>	6.57023732
				7.56	3470	6.57458559	
26	320	32	4976.3	<u>2.17</u>	<u>1611</u>	<u>6.70302359</u>	6.72839643
				2.2	1621	6.75376928	
27	400	32	7803.7	<u>0.88</u>	<u>1003</u>	<u>6.84671585</u>	6.97587689
				1.2	1318	7.10503794	
28	500	32	12221.6	<u>1.12</u>	<u>2090</u>	<u>6.54937416</u>	6.59197851
				1.14	2100	6.63458286	