



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“ESTUDIO GEOELÉCTRICO EN EL VALLE  
DE SAN FELIPE, BAJA CALIFORNIA”**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO GEOFÍSICO**

P R E S E N T A:  
**GONZÁLEZ AVILA DANIEL**



DIRECTORA DE TESIS: DRA. CLAUDIA ARANGO GALVÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D.F. 2015



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.

# ÍNDICE

## Abstract

<b>1. <u>Introducción</u></b> .....	<b>1</b>
<b>2. <u>Fundamentos Teóricos</u></b> .....	<b>3</b>
2.1. <u>Ecuaciones de Maxwell</u> .....	3
2.2. <u>Ecuación de Onda</u> .....	4
2.3. <u>Condiciones de Frontera</u> .....	5
2.4. <u>Solución de la Ecuación de Onda</u> .....	6
2.5. <u>Fundamentos Básicos del Transitorio Electromagnético</u> .....	7
2.6. <u>Configuraciones de los Transitorios Electromagnéticos</u> .....	13
2.7. <u>Errores presentes en los Transitorios Electromagnéticos</u> .....	15
2.8. <u>Modelado</u> .....	16
2.8.1. <u>Problema Directo</u> .....	16
2.8.2. <u>Problema Inverso</u> .....	18
<b>3. <u>Antecedentes de la Zona de Estudio</u></b> .....	<b>22</b>
3.1. <u>Ubicación</u> .....	22
3.2. <u>Marco Geológico</u> .....	24
3.2.1. <u>Geología Regional</u> .....	24
3.2.2. <u>Estratigrafía</u> .....	27
3.2.3. <u>Geología Estructural</u> .....	28
3.3. <u>Geología del subsuelo</u> .....	29
3.4. <u>Hidrología</u> .....	32
<b>4. <u>Implementación de Campo y Adquisición de Datos</u></b> .....	<b>34</b>
<b>5. <u>Análisis y Procesamiento de Datos</u></b> .....	<b>36</b>
5.1. <u>Procesamiento</u> .....	36
5.2. <u>Análisis</u> .....	39
<b>6. <u>Discusión de Resultados</u></b> .....	<b>46</b>
<b>7. <u>Conclusiones</u></b> .....	<b>54</b>
<b><u>Bibliografía</u></b> .....	<b>56</b>
<b><u>Anexos</u></b> .....	<b>59</b>

## Índice de figuras

- Figura 2.1.** Corrientes inducidas dada una corriente continua en el medio por una bobina transmisora.
- Figura 2.2.** Etapas de decaimiento de potencial (Mc Neil, 1995).
- Figura 2.3.** Comportamiento de conductores y comportamiento de la Conductividad después de una corriente de excitación (Nabighian y Macnae, 1991).
- Figura 2.4.** Decaimiento del campo magnético Hz y su derivada temporal (Ward y Hohmann, 1988).
- Figura 2.5.** Arreglos de bobinas en los sondeos TEM (Nabighian y Macnae, 1991).
- Figura 3.1.** Área de interés (SGM, 2015).
- Figura 3.2.** Provincias fisiográficas presentes en Baja California (INEGI, 2015).
- Figura 3.3.** Terrenos tectonoestratigráficos del Estado de Baja California (SGM, 2015).
- Figura 3.4.** Geología regional y columna geológica del estado de Baja California (SGM, 2015).
- Figura 3.5.** Geología estructural de Baja California (Lonsdale, 1989; Delgado-Argote, 1996; Lewis, 1996).
- Figura 3.6.** Geología del Valle de San Felipe, Baja California (SGM, 2015; CONAGUA, 2008).
- Figura 3.7.** Principales afluentes en el Valle de San Felipe, Baja California, (SGM, 2015; INEGI, 2015).
- Figura 3.8.** Acuífero San Felipe-Punta Estrella (SMG, 2015; CONAGUA, 2008).
- Figura 4.1.** Equipo de trabajo TerraTEM.
- Figura 4.2.** Localización de los TEM y tabla con coordenadas de los sitios.
- Figura 5.1.** Procedimiento para la obtención de las curvas de resistividad aparente (software de proceso TEMIXS).
- Figura 5.2.** Muestra del Sitio 5 con la obtención de modelo suavizado 1D y modelo de capas con Winglink.
- Figura 5.3.** Distribución y localización de los perfiles propuestos en el área de estudio.
- Figura 5.4.** Perfil geoeléctrico 1. Valle de San Felipe, Baja California
- Figura 5.5.** Perfil geoeléctrico 2. Valle de San Felipe, Baja California
- Figura 5.6.** Perfil geoeléctrico 3. Valle de San Felipe, Baja California
- Figura 5.7.** Perfil geoeléctrico 4. Valle de San Felipe, Baja California
- Figura 5.8.** Perfiles geoeléctricos en el Valle de San Felipe, Baja California.
- Figura 5.9.** Nivel estático Valle de San Felipe, Baja California (CONAGUA, 1989)
- Figura 6.1.** Ubicación de perfiles propuestos, perfiles de SARH (1984) y perfiles de CONAGUA (1989).
- Figura 6.2.** A) Perfil hidrogeológico EE' de CONAGUA (1989) y B) perfil geoeléctrico 5.
- Figura 6.3.** A) Perfil hidrogeológico GG' de CONAGUA (1989) y B) perfil geoeléctrico 6.
- Figura 6.4.** Perfil geoeléctrico 7.
- Figura 6.5.** Perfil AA' simplificado (CONAGUA, 1984).

## Índice de tablas

- Tabla 2.1.** Diferencias de campo medidos respecto al tamaños de las bobinas (Nabighian, 1991).
- Tabla 5.1.** Unidades geoeléctricas inferidas en los sondeos transitorios electromagnéticos.
- Tabla 6.1.** Comparación de resultados con el trabajo previo de 1989.
- Tabla 6.2.** Conjunción de las unidades geoeléctricas con las unidades hidrogeológicas.

## **Anexos**

- Anexo 01.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 02.
- Anexo 02.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 03.
- Anexo 03.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 04.
- Anexo 04.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 05.
- Anexo 05.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 06.
- Anexo 06.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 07.
- Anexo 07.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 08.
- Anexo 08.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 09.
- Anexo 09.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 10.
- Anexo 10.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 11.
- Anexo 11.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 12.
- Anexo 12.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 13.
- Anexo 13.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 14.
- Anexo 14.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 15.
- Anexo 15.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 16.
- Anexo 16.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 17.
- Anexo 17.** Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 18.
- Anexo 18.** Perfil geoelectrico 1 simplificado.
- Anexo 19.** Perfil geoelectrico 2 simplificado.
- Anexo 20.** Perfil geoelectrico 3 simplificado.
- Anexo 21.** Perfil geoelectrico 4 simplificado.

## Summary

About 37% of water resources of our country are extracted from aquifers and the increasing demand of such resource has exposed water supply resources into serious risk. For instance, of all groundwater sources, 16% are overexploitation. For this reason, it is imperative to conduct a proper management of subsoil-extracted water resources, in order to prevent that the number of overexploited aquifers increases. In order to achieve this goal, it is necessary to know in detail the characteristics of every aquifer, to maintain the proportion between extracted and recharged water

Electromagnetic methods are suitable tools for this task. In this study the Transient Electromagnetic Method (TEM) is used, because this method characterizes the distribution of a parameter sensitive to changes in the medium with water presence (electric conductivity), which allows obtaining resistivity models which help to approximate the location of resources of interest.

In San Felipe Valley, Baja California, there is an aquifer which is defined by the water authorities as underexploited. In order to continue fulfilling the necessity to supply nearby communities without falling into the situation of draining more than the recharge allows, it is planned to provide further information, in order to improve not only the exploitation process but also the resource management.

Seventeen electromagnetic sounding were used for this work, which were acquired with a simple coil of 50 m by side. Which were parts of a previous conducted magnetotelluric study for geothermal prospecting. Therefore, the acquisition parameters were designed only to perform a static correction of the MT sites. Nevertheless, these TEM sounding allow us to characterize electrical properties of the shallow subsurface of the San Felipe valley. The work developed consists of 3 stages; the first one, a preprocessing of the data to generate the resistivity curves; the second stage consisted of data processing, to generate resistivity models. Finally, the last stage consisted of an information analysis to interpret the obtained models.

Obtained models allowed the geoelectrical characterization of the shallow subsurface of the San Felipe Valley. This information was correlated with already published information confirming the existence of a shallow aquifer, currently in exploitation. Thus, this study contributes to get a better insight of the San Felipe-Punta Estrella aquifer, Baja California.

## Resumen

El 37% de los recursos hídricos de nuestro país son extraídos de acuíferos subterráneos y la creciente demanda de dicho recurso ha llevado a poner en grave riesgo las fuentes de suministro. Por ejemplo, del total de fuentes subterráneas, el 16% se encuentran en sobreexplotados. Por esta razón, es imperativo realizar una buena gestión de los recursos hídricos extraídos del subsuelo, a fin de evitar que el número de acuíferos sobre explotados aumente. Con el fin de lograr este objetivo, es necesario conocer en detalle las características de cada acuífero, para mantener la proporción entre el agua extraída y recargado

Los métodos electromagnéticos son herramientas adecuadas para esta tarea. En el presente trabajo se utiliza el Método Transitorio Electromagnético (TEM), debido a que dicho método caracteriza la distribución de un parámetro sensible a cambios en el medio con la presencia de agua (conductividad eléctrica), lo que permite obtener modelos de resistividad que ayudan a aproximar la ubicación de los recursos de interés.

En el Valle de San Felipe, Baja California, existe un acuífero que se encuentra definido por las autoridades hídricas como subexplotado. Para poder seguir cumpliendo con la necesidad de abastecer a las comunidades cercanas, sin caer en la situación de tomar más de lo que la recarga permite, se plantea aportar más información a la ya existente, con el fin de mejorar no sólo el proceso de explotación, sino también la gestión de los recursos.

Para el presente trabajo se utilizaron 17 sondeos de transitorio electromagnético, adquiridos con una bobina simple de 50 m por lado, los cuales formaban parte de un estudio magnetotelúrico cuya distribución obedece a los objetivos originales de una prospección geotérmica. Así, los parámetros de adquisición solo estaban diseñados para realizar una corrección estática de los sitios de MT. Sin embargo, estos sondeos electromagnéticos permiten caracterizar las propiedades eléctricas del subsuelo poco profundo del Valle de San Felipe. El trabajo desarrollado consta de tres etapas, la primera se realizó un pre procesamiento de los datos para generar las curvas de resistividad; la segunda etapa de este trabajo consistió en el procesamiento de los datos, para generar modelos de resistividad. Finalmente, para la etapa tres se realizó un análisis de información para interpretar los modelos obtenidos.

Los modelos obtenidos permitieron la caracterización geoelectrica del subsuelo poco profundo del Valle de San Felipe. Dicha información fue correlacionada con datos ya publicados del acuífero, actualmente en explotación. Por lo tanto, este estudio contribuye a tener una mejor visión del acuífero de San Felipe-Punta Estrella, Baja California.



## Introducción

Debido al crecimiento desmesurado en la demanda de agua causada por el aumento de la población, el uso excesivo por el sector industrial y agrícola, la satisfacción en la necesidad de este recurso para la sociedad es cada vez más difícil, pues sólo el 4% del agua en el planeta se considera apta para uso humano (UNESCO, 2003). Teniendo estos antecedentes, se sabe que llegará un punto en el que los recursos hídricos para el consumo humano se agotarán.

Se sabe que en México la disponibilidad natural media de agua para el año 2,000 se estimó en 4,900 m<sup>3</sup> por persona (CONAGUA, 2000), mientras que para 2013 se estimó en 3,982 m<sup>3</sup> por persona (CONAGUA, 2014), esta cifra es baja para las necesidades que tiene cada persona y es un claro ejemplo de la disminución de la disponibilidad del líquido, y se estima que para 2025 la demanda se incrementará y se contará con 3,822 m<sup>3</sup> de agua por habitante. Esta exigencia del recurso según la Comisión Nacional de Agua (2014) se satisface en su mayoría de fuentes superficiales, representando un aporte total de 62.8 % de la demanda de agua para uso humano, y el resto corresponde a fuentes subterráneas. Se cuenta con 653 acuíferos (CONAGUA, 2014), de los cuales 106 (16%) son considerados acuíferos sobreexplotados, pues de ellos se extrae el 55.2% de agua subterránea. Lo cual no implica que los recursos hídricos sean bien gestionados sino que la demanda de agua aún no es tan grande como para desequilibrar el sistema, pero con la presente situación es muy probable que cambie este equilibrio en un futuro, por lo que debe haber una buena administración del recurso y poder esclarecer una mejor sustentabilidad del mismo.

Para el estado de Baja California, el cual pertenece a la región I de la distribución de zonas hídricas, cuenta con un clima seco y cálido, con pocas lluvias durante el año. Por lo que la disponibilidad natural de la región es de 1,162 hm<sup>3</sup> por año a través de siete regiones hidrológicas. Se aprovecha el recurso de fuentes superficiales provenientes del Río Colorado y de un total de 88 acuíferos. En general, aunado a los temas ya mencionados del aumento en la demanda, se tiene una baja eficiencia de los sistemas para la distribución y una serie de factores que provocan la deficiencia de una gestión adecuada del recurso, por lo que es prioridad la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable, e implicando conocer con mayor detalle los recursos hídricos subterráneos actualmente disponibles.

El acuífero en cuestión es el acuífero de San Felipe – Punta Estrella, y según la Comisión Nacional del Agua (2008) se reconocen un total de 58 aprovechamientos de agua subterránea, entre norias y pozos, de los cuales sólo 19 continúan activos y el resto presenta problemas de calidad. Este acuífero es considerado subexplotado y dadas sus características es de tipo libre, conformado por un medio granular y otro fracturado, de la parte granular es donde actualmente se explota el recurso. Por tanto es un motivo suficiente para identificar nuevas zonas que puedan ser usadas para extracción de agua, teniendo como premisa una buena gestión para el recurso.

Es aquí donde entra la Geofísica con sus técnicas las cuales han resultado ser adecuadas para brindar información suficiente si se le tienen las consideraciones necesarias. Los métodos electromagnéticos son los indicados para proporcionar información de recursos hídricos, debido que trata con un parámetro que muestra cambios significativos con la presencia de agua, que es la conductividad eléctrica, por lo que se recurre a su uso en el presente trabajo.

Originalmente los datos de este trabajo se adquirieron para fines de exploración geotérmica a gran escala como una técnica para la corrección de datos magnetotelúricos, pero aun así considero pertinente procesar estos datos con fines de caracterización hidrogeológica, para aumentar la información existente de la zona de estudio, teniendo en cuenta de antemano las limitaciones espaciales por la adquisición de los datos. Así, se espera que los datos puedan contribuir con los modelos presentados de manera sustancial a mejorar la gestión del recurso y así poder satisfacer la demanda a largo plazo tanto en el municipio como en el estado.

## 2. Fundamentos Teóricos

### 2.1. Ecuaciones de Maxwell

Dentro de los métodos electromagnéticos existe una relación estrecha entre el campo eléctrico y el campo magnético, por lo cual se definen sí. Como concepto fundamental se encuentran las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen los fenómenos electromagnéticos.

Las ecuaciones que explican el comportamiento de los fenómenos electromagnéticos en el dominio del tiempo se describen de la siguiente manera:

$$\text{Ley de Faraday} \quad \nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (2.1)$$

$$\text{Ley de Ampere} \quad \nabla \times H = J + \frac{dD}{dt} \quad (2.2)$$

$$\text{Ley de Gauss (caso eléctrico)} \quad \nabla \cdot D = \rho \quad (2.3)$$

$$\text{Ley de Gauss (caso magnético)} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (2.4)$$

dónde:

E : Campo Eléctrico	[V/m]
B : Campo de Inducción Magnética	[T] o [Wb/m <sup>2</sup> ]
H : Campo Magnético	[A/m]
J : Densidad de Corriente	[A/m <sup>2</sup> ]
D : Desplazamiento Eléctrico	[C/m <sup>2</sup> ]
$\rho$ : Densidad de Carga Eléctrica	[C/m <sup>2</sup> ]

Para poder resolver las ecuaciones mencionadas se hace uso de las relaciones constitutivas, las cuales permiten la relación entre campos (eléctrico y magnético). En ellas se involucran tres parámetros:  $\epsilon$ ,  $\mu$  y  $\sigma$ ; que son la permitividad eléctrica, la permeabilidad magnética y la conductividad eléctrica, respectivamente. Asumiendo que cada uno de estos tensores considera un medio homogéneo, lineal e isótropo, y tienen características independientes de la temperatura, del tiempo y la presión para poder explicar la propagación de las ondas magnéticas (Ward y Hohmman, 1988). Las relaciones constitutivas son las siguientes:

$$D = \epsilon E \quad \epsilon : \text{Permitividad Eléctrica [F/m]} \quad (2.5)$$

$$B = \mu H \quad \mu : \text{Permeabilidad Magnética [H/m]} \quad (2.6)$$

$$J = \sigma E \quad \sigma : \text{Conductividad Eléctrica [S/m]} \quad (2.7)$$

## 2.2. Ecuación de Onda

Dadas las ecuaciones de Maxwell, se describe la propagación de las ondas de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la Tierra. Para ello, se consideran las Leyes de Faraday y Ampere (2.1 y 2.2, respectivamente), así como las relaciones constitutivas antes mencionadas. Por lo que, aplicado el rotacional a ambas leyes se obtiene (Ward y Hohmann, 1988):

$$\nabla^2 H - \sigma\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla^2 E - \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Sí y sólo sí } \nabla \bullet E = 0 \\ \text{(no hay acumulación de carga)} \end{array} \quad (2.9)$$

Asumiendo que E y H son continuas y poseen primera y segunda derivada al tener dependencia temporal, se tiene que:

$$E = E_0 e^{-i(\omega t + \psi)} \quad (2.10)$$

$$H = H_0 e^{-i(\omega t + \psi)} \quad (2.11)$$

Sustituyendo y simplificando 2.10 y 2.11 en 2.8 y 2.9, respectivamente, se observa que:

$$\nabla^2 H + (-i\omega\sigma\mu + \omega^2\varepsilon\mu)H = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 E + (-i\omega\sigma\mu + \omega^2\varepsilon\mu)E = 0 \quad (2.13)$$

De donde se sabe que se define como propagación de onda al cuadrado de  $(-i\omega\sigma\mu + \omega^2\varepsilon\mu)$ . Reescribiendo las ecuaciones se tiene que:

$$\nabla^2 H + \gamma^2 H = 0 \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 E + \gamma^2 E = 0 \quad (2.15)$$

Considerando un modelo cuasiestacionario donde  $|(\omega^2 \epsilon \mu)| \ll |(\omega \sigma \mu)|$ , implica que las corrientes de desplazamiento son mucho menores a las corrientes de conducción, entonces la constante de propagación se aproxima a  $\gamma^2 \approx -i\mu\sigma\omega$  (Ward y Hohmman, 1988), por lo que las ecuaciones se reescriben como:

$$\nabla^2 H - i\omega\sigma\mu H = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla^2 E - i\omega\sigma\mu E = 0 \quad (2.17)$$

El modelo se utiliza para caracterizar conductores y es válido sólo para bajas frecuencias, puesto que se aproxima al comportamiento de una corriente continua (Vozoff, 1991). Además, se asume la incidencia de onda plana, donde en cualquier plano de E y H es constante.

### 2.3 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son consecuencia de las ecuaciones de Maxwell (Ward y Hohmann, 1988) se explican como sigue:

La componente normal del campo magnético es continua a través de la interfase de separación entre el medio 1 y el medio 2.

$$Bn_1 = Bn_2 \quad (2.18)$$

La componente normal del desplazamiento dieléctrico  $Dn$  es continua a través de la interfase debido a la acumulación en la densidad de carga superficial  $\rho_s$ .

$$Dn_1 - Dn_2 = \rho_s \quad (2.19)$$

La componente tangencial del campo eléctrico  $Et$  es continua a través de la interfase.

$$Et_1 = Et_2 \quad (2.20)$$

La componente tangencial del campo magnético  $Ht$  es continua a través de la interfase siempre y cuando no haya corriente superficial.

$$Ht_1 = Ht_2 \quad (2.21)$$

La componente normal de la densidad de corriente  $Jn$  es continua a través de la interfase.

$$Jn_1 = Jn_2 \quad (2.22)$$

## 2.4 Solución de la Ecuación de Onda

Para dar solución a la ecuación de onda, se toman 2.16 y 2.17, que son ecuaciones de segundo orden con dos soluciones, considerando la solución con dependencia temporal como antes se había mencionado (2.10 y 2.11), se tiene:

$$E = E_0^+ e^{-i(-\omega t + \gamma z)} + E_0^- e^{i(-\omega t + \gamma z)} \quad (2.23)$$

$$H = H_0^+ e^{-i(-\omega t + \gamma z)} + H_0^- e^{i(-\omega t + \gamma z)} \quad (2.24)$$

Donde  $\gamma$  es un número complejo (Stratton, 1941),  $E_{0\pm}$  y  $H_{0\pm}$  son las amplitudes iniciales en  $Z = 0$  con  $t = 0$  y el signo implica la dirección en que sucede la propagación de onda, donde:

$$\alpha = \left\{ \frac{\mu\omega}{2} (\sigma^2 + \varepsilon^2 \omega^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon\omega \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

$$\beta = \left\{ \frac{\mu\omega}{2} (\sigma^2 + \varepsilon^2 \omega^2)^{\frac{1}{2}} - \varepsilon\omega \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

Para el modelo cuasiestacionario se tendría que alfa y beta son iguales, reescribiéndose las ecuaciones 2.23 y 2.24 como:

$$\alpha = \beta = \left( \frac{\omega\sigma\mu}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

Considerando que el decaimiento en dirección al eje Z de las ecuaciones 2.23 y 2.24 representa una atenuación en la amplitud de la onda electromagnética en una distancia  $\delta$ , que si dicha distancia cumple la relación  $1/e$  se le conoce como penetración nominal o skin depth, (Ward y Hohmann, 1988):

$$\delta = \left( \frac{2}{\omega\sigma\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

Mientras que si la atenuación llega a la mitad de la amplitud inicial se le conoce como penetración efectiva.

## 2.5 Fundamentos básicos del Transitorio Electromagnético

Los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM) consisten en realizar mediciones del suelo energizado por un arreglo de bobinas que dejan pasar una corriente continua (fuente controlada) que se inyecta en el subsuelo, después de aplicar la corriente ésta se interrumpe súbitamente, lo cual provoca una excitación en el medio. Provocando que el cambio repentino del campo primario de la bobina transmisora genere corrientes inducidas en un conductor para satisfacer la ley de Faraday (Nabighian y Macnae, 1991), figura 2.1.

Dichas corrientes, según el modelo cuasiestático, estarán sobre la superficie del conductor, con una magnitud y dirección tal que permita preservar la componente normal del campo magnético primario.

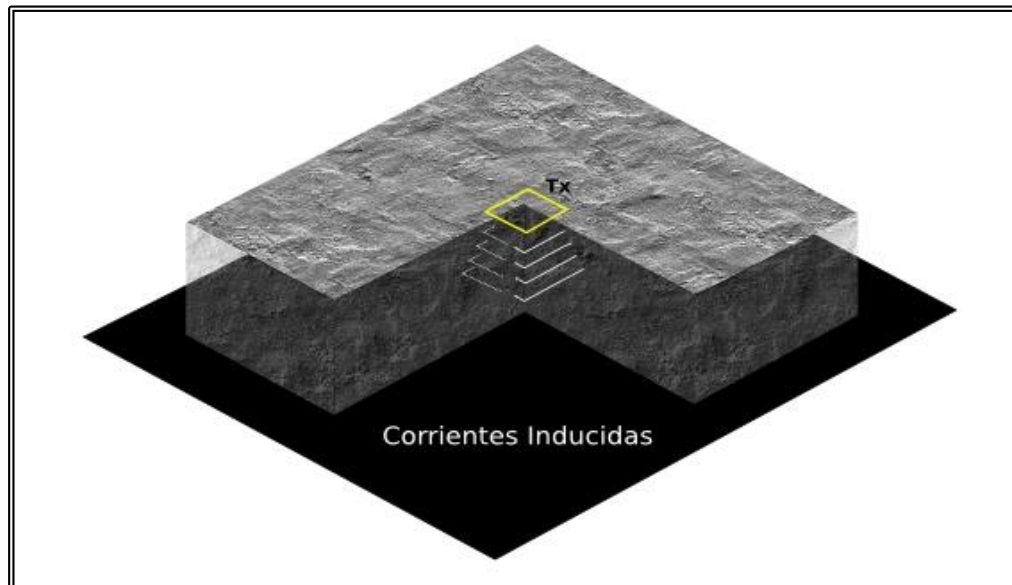


Figura 2.1. Corrientes inducidas dada una corriente continua en el medio por una bobina transmisora.

Para el tiempo  $t_0$  se sabe que el campo magnético será constante y las corrientes inducidas no están presentes en el medio, mientras que para cualquier punto del exterior el campo magnético va a cambiar repentinamente, conociéndose a esta etapa como etapa temprana (early time) en el proceso transitorio. Durante esta etapa las corrientes de superficie son independientes de las características de conductividad del cuerpo, por lo que las corrientes son poco dependientes de la conductividad. Dentro del conductor habrá un decremento en el campo magnético y con ello las corrientes inducidas empezaran a transmitirse repitiéndose hacia el interior, siendo ésta la etapa intermedia (intermediate time). Cuando el proceso termina, se le conoce como etapa tardía (late time) debido a que la configuración y la distribución de las corrientes inducidas deja de variar en el tiempo (Grand y West, 1965), figura 2.2.

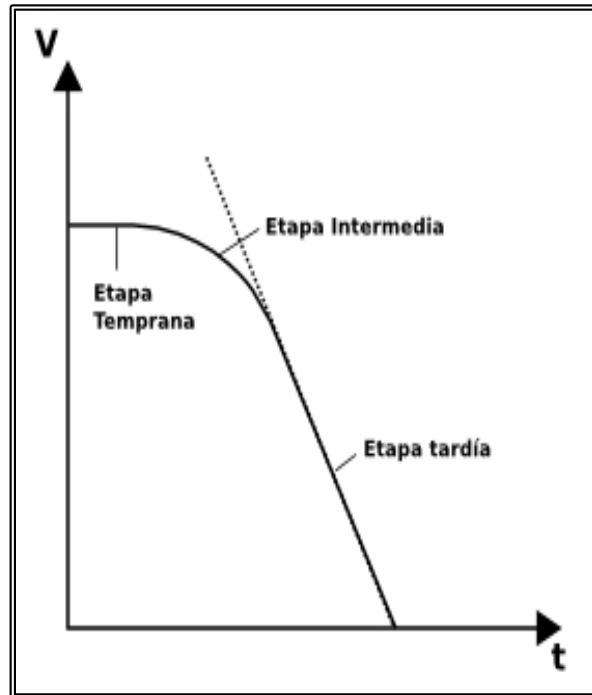


Figura 2.1. Etapas de decaimiento de potencial, Mc Neil, 1995.

Las mediciones de todo el trayecto de la corriente en el medio están en función del tiempo por lo que son detectadas por una bobina receptora (Rx, pudiendo ser la misma bobina transmisora, Tx), que registra la atenuación del campo magnético. Por lo que tenemos un promedio por ventanas que se le atribuye a un volumen.

La manera en que decae el voltaje registrado contiene información sobre la resistividad, ya que ésta depende de la magnitud y distribución de la corriente inducida. Siendo que, en medios poco conductores los voltajes iniciales son altos pero el campo decae más rápidamente. La función que explica la incitación de la bobina transmisora (Tx) es de tipo escalón con una rampa que explica cuando deja de afectar el campo primario y comienza a actuar el campo secundario (figura 2.1).

Una vez que se trasmite la corriente por la bobina transmisora, la corriente que fluye en el medio conductor es (Grand y West, 1965):

$$I(t) = \frac{M_{01}I_0}{L} e^{(-t/\tau)} \quad t \geq 0 \quad (2.29)$$



dónde

$M_{ij}$  : Inductancia mutua

$I_0$  : Corriente en el transmisor

$\tau$  : Constante de tiempo en el subsuelo ( $\tau = L/R$ )

$R$  : Resistencia del medio

$L$  : Inductancia del medio

Mientras que para la bobina receptora (Rx) el voltaje es proporcional a la variación en el tiempo del campo magnético secundario que se crea por la corriente en el subsuelo:

$$e_s(t) = M_{12} \frac{\partial I}{\partial t} = \left( \frac{I_0 M_{01} M_{12}}{L} \right) \delta(t) - \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau} \quad t \geq 0 \quad (2.30)$$

Donde la expresión anterior describe las principales características de los campos transitorios, con buenos conductores el voltaje inicial es menor pero decae lentamente y ocurre lo contrario para los malos conductores que tienen valores iniciales altos y decaen rápidamente (figura 2.3).

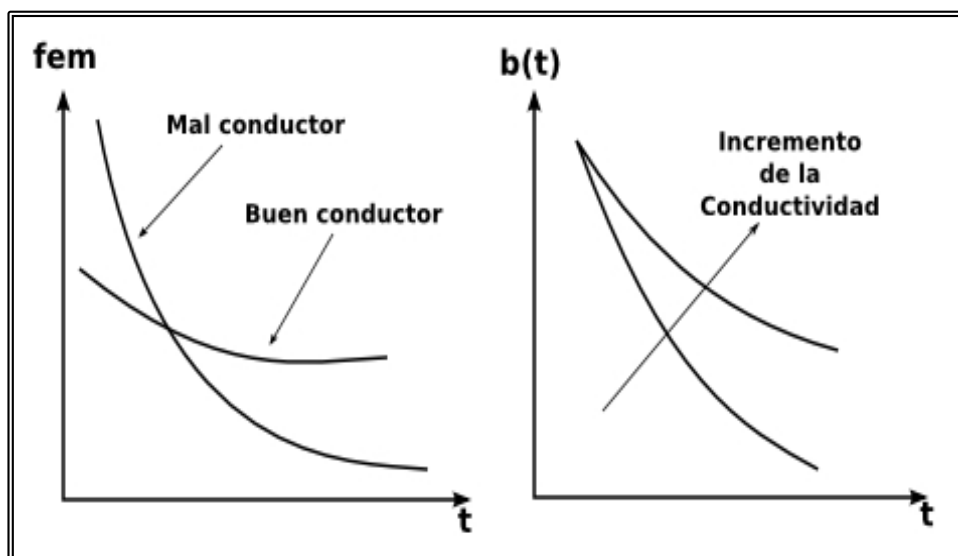


Figura 2.3. Comportamiento de conductores y comportamiento de la Conductividad después de una corriente de excitación (Nabighian y Macnae, 1991).

A pesar de que el método toma mediciones con una bobina cuadrada, teóricamente para poder obtener la componente vertical del campo magnético se considera que la bobina tiene la forma circular, esta componente se obtiene para reducir el efecto de variaciones laterales (Ward y Hohmann, 1988), dicha componente se define como:

$$H_z = -\frac{I}{K^2 a^3} 3 - (3 + 3iak - a^2 k^2) e^{-ika} \quad (2.31)$$

donde

a : Es el radio de la bobina

Para poder obtener la respuesta transitoria de una señal de tipo escalón, se tiene que dividir entre  $i\omega$  y aplicarle la transformada inversa de Laplace a 2.31. Resulta que el campo magnético en el centro de la bobina después de apagar la corriente se exprese como:

$$H_z = \frac{I}{2a} \left[ \frac{3}{(\pi\theta a)} e^{-\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2}\right) \text{erf}(\theta a) \right] \quad (2.32)$$

Siendo erf, la función de error definida como:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\pi^{0.5}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.33)$$

$$\theta = \left( \frac{\mu_0 \sigma}{4t} \right)^{0.5} \quad (2.34)$$

El término  $\frac{I}{2a}$  representa el campo magnético en el espacio libre justo antes de que se deje de inyectar la corriente, que si se multiplica por el segundo término de la ecuación 2.32 nos brindará información del decaimiento del campo magnético. La siguiente figura (2.4) se muestra el comportamiento del campo magnético y su derivada (2.35) cuando decae en función del tiempo para el centro de la bobina, el campo transitorio debido a un sistema de corrientes circulares con la misma dirección que la corriente a transmitir. En la dirección Z la corriente se mueve con una velocidad de  $\frac{2}{(\pi\sigma\mu_0)^{0.5}}$  y su radio de corriente aumenta en proporción de  $\left(\frac{4.37t}{\sigma\mu_0}\right)^{0.5}$  (Nabighian y Macnae, 1991).

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{-I}{\sigma\mu_0 a^3} - \left[ 3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\pi^{0.5}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (2.35)$$

Se observa que en tiempos cortos el campo magnético vertical y su derivada respecto al tiempo son constantes, mientras que en tiempos largos decaen con una pendiente de  $t^{-3/2}$  y  $t^{-5/2}$ , respectivamente. Por lo tanto, es posible aproximar las ecuaciones 2.34 y 2.35 para obtener las expresiones del voltaje registrado por el receptor.

$$H_z \approx \frac{I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{30\pi^{0.5}} t^{-3/2} \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} \approx -\frac{I\sigma^{3/2}\mu_0^{3/2}a^2}{20\pi^{0.5}} t^{-5/2} \quad (2.37)$$

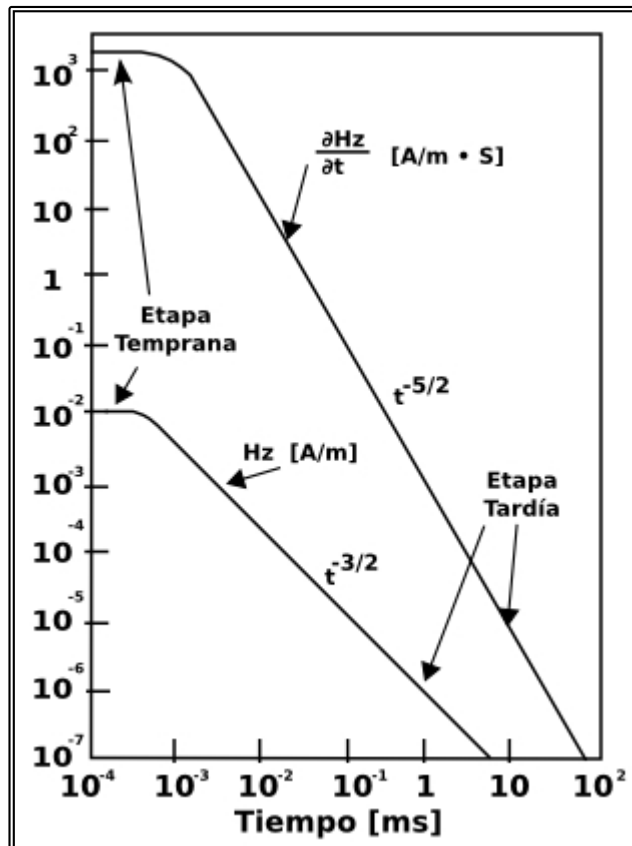


Figura 2.4. Decaimiento del campo magnético  $H_z$  y su derivada temporal (Ward y Hohmann, 1988).

La resistividad aparente es obtenida a partir del voltaje registrado por el receptor, la cual es variante según el comportamiento de decaimiento del campo magnético. Spies *et al.* (1986) definieron el voltaje para tiempos cortos y tiempos largos para las capas principales del decaimiento del campo magnético, como:

$$V = \frac{3mI}{\sigma a^3} \quad (2.38)$$

$$V = \frac{I\sigma^{(3/2)}\mu^{(5/2)}ma^2}{20\pi^{(0.5)}t^{(5/2)}} \quad (2.39)$$

Donde  $m$  es el producto del número de vueltas en la bobina receptora por el área de la bobina. Reescribiendo las ecuaciones 2.38 y 2.39 para la resistividad en tiempos cortos y tiempos largos, respectivamente se obtiene:

$$\rho_a = \frac{Va^3}{3mI} \quad (2.40)$$

$$\rho_a = \frac{I^{(2/3)}\mu^{(5/3)}m^{(2/3)}a^{(4/3)}}{20^{(2/3)}(\pi)^{(1/3)}t^{(5/3)}V^{(2/3)}} \quad (2.41)$$

Debido a que los resultados anteriores involucran dos ecuaciones segmentando el tiempo, Christensen (1995), definió que es posible obtener la resistividad aparente para todos los tiempos, cortos y largos, tratándose de una señal tipo escalón, expresándose como:

$$\rho_a = \frac{\mu a^2}{4t\theta^2 a^2} \quad (2.42)$$

Para modelos estratificados la ecuación anterior presenta una transición suave al cambiar la resistividad en el subsuelo. Por otra parte, para lograr que las resistividades aparentes sean más aproximadas a la distribución de resistividades en el subsuelo es necesario asociarla con la profundidad de difusión, para lo cual se realizan gráficos donde la resistividad aparente está en función de la profundidad de difusión, las ecuaciones correspondientes de profundidad de difusión para un semiespacio homogéneo se define como:

$$d = \left(\frac{2t}{\mu\sigma}\right)^{0.5} \quad (2.43)$$

Teniendo la resistividad aparente en función del tiempo previamente calculada, se puede definir la profundidad de difusión para cada dato medido como:

$$d = \left( \frac{2t\rho_a(t)}{\mu\sigma} \right)^{0.5} \quad (2.44)$$

## 2.6 Configuraciones de los Transitorios Electromagnéticos

Para la adquisición de datos en campo se tienen diversas formas por las cuales se realizan las mediciones (Nabighian y Macnae, 1991), dichos arreglos geométricos a los que se les aplica una corriente, dependen de la disposición de las bobinas transmisora y receptora para definir el tipo de arreglo con el que se vaya a trabajar, los casos más comunes utilizan bobinas rectangulares ( figura 2.5):

- *Bobina Simple.* El arreglo está diseñado para que utilice una única bobina para ambas funciones (transmisor y receptor), por lo que al suministrarle corriente actúa como transmisora, y para cuando se corta la corriente, la bobina actúa como receptora.
- *Bobina Coincidente.* A diferencia de una bobina simple, cuenta con dos bobinas, uno se encarga de transmitir y la otra de recibir, por lo que se consideran circuitos independientes.
- *Bobina Central.* El arreglo es una variante de la bobina coincidente, que usa un magnetómetro de inducción en el centro de la bobina transmisora.
- *Bobinas Separadas.* Para este arreglo las bobinas se encuentran separadas adyacentemente por una distancia fija definida y conectada como circuito en paralelo, lo cual permite un mejor acoplamiento con los conductores verticales. Reduciéndose el ruido causado por fuentes que interfieren con la señal. Una variante consiste en considerar a la bobina receptora como un dipolo receptor.
- *Bobina Doble.* El arreglo consiste en un par de bobinas conectadas en paralelo para un mejor acoplamiento con conductores verticales, teniendo como ventaja que el ruido inducido por las fuentes es opuesta a las bobinas por lo que se logra disminuir el ruido. Por otra parte, si existen variaciones laterales de conductividad la reducción de ruido es ineficiente.
- *Transmisor fijo grande, receptor móvil.* El arreglo consta de una bobina transmisora fija y una bobina receptora móvil, que se encarga de realizar las mediciones a lo largo de las líneas perpendiculares a la bobina. El arreglo puede posicionarse si se conocen características del conductor en el medio.

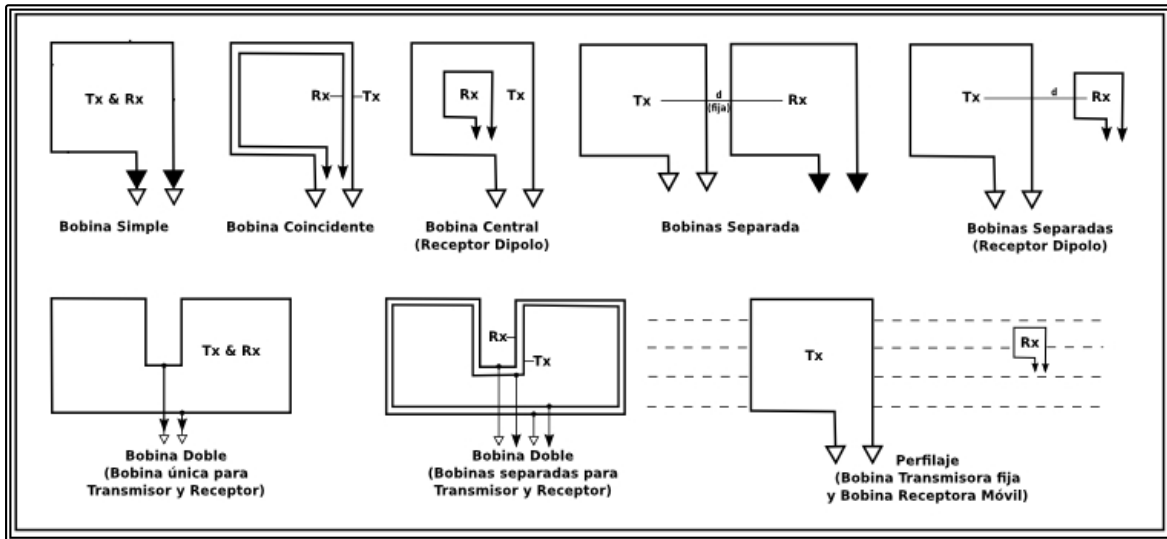


Figura 2.5. Arreglos de bobinas en los sondeos TEM (Nabighian y Macnae, 1991).

Para los diseños de los TEM se debe considerar el tamaño de la bobina, ya que una bobina grande por lo general alcanza una mayor profundidad de penetración debido al incremento del área, dado que la fuerza del campo primario y el momento de transmisor aumentan. Se considera teóricamente que el decaimiento del campo magnético en una bobina grande es  $1/r$ , mientras que en una bobina pequeña es del orden de  $1/r^3$ , siendo  $r$  la distancia entre la bobina y el objetivo.

Nabighian y Macnae (1991) consideran que el cuerpo conductor y el ruido son pequeños y que la señal de la fuente es proporcional a la fuerza del campo magnético primario, por lo que sintetiza en la tabla 2.1, las diferencias en la profundidad de penetración que existe al utilizar bobinas grandes o pequeñas.

Tabla 2.1. Diferencias de campo medidos respecto al tamaño de las bobinas.

Bobinas Pequeñas	Bobinas Grandes
$b_s \approx \frac{1}{r^3}$	$b_s \approx \frac{1}{r}$
$b_t \approx \frac{1}{r_t^3}$	$b_t \approx \frac{1}{r_t^3}$
$b_n \approx \frac{1}{r_n^3}$	$b_n \approx \frac{1}{r_n^3}$

Donde  $r_t$  y  $r_n$  son las distancias del receptor al objetivo del subsuelo y a la fuente de ruido geológico respectivamente.  $b_s$  es la fuerza del campo magnético primario, mientras que  $b_t$  y  $b_n$  representan la fuerza de los campos secundarios para el objetivo y la fuente de ruido.

## 2.7. Errores presentes en los Transitorios Electromagnéticos

Los sondeos Transitorios Electromagnéticos presentan diferentes fuentes de error, las cuales se pueden clasificar como sigue (Nabighian y Macnae, 1991):

- *Geométricos.* Estos errores se deben a la relación geométrica presente entre el transmisor y el receptor, el error se desprecia ya que es mínimo y además porque las mediciones se realizan con el transmisor apagado. Por otra parte, la topografía es otra fuente de error y para su corrección debe considerarse la posición relativa entre estaciones y el sistema de corrientes inducidas presentes en el subsuelo, esto cuando la roca es muy resistiva.
- *Efectos Culturales.* Estas fuentes de error se deben a conductores como lo son las líneas de teléfono y alta tensión, también tuberías, cercas, entre otras que produzcan anomalías durante las mediciones de los TEM. Teniendo la capacidad de canalizar las corrientes que se inducen en el subsuelo en la roca circundante, se puede minimizar dicha respuesta si se coloca las bobinas transmisoras simétricamente sobre las fuentes de ruido.
- *Ruido Electromagnético.* Dentro de este tipo de ruido se encuentra el ruido geomagnético, siendo señales menores a 1Hz provenientes principalmente de la ionosfera, mientras que las señales mayores a 1Hz son originadas por tormentas eléctricas que generan campos transitorios naturales. Otro tipo de ruido es el generado por el hombre, como lo son las redes eléctricas y estaciones de radio, donde se generan frecuencias entre 50 y 60 Hz y los 10 y 25 KHz, respectivamente. Estos últimos afectan demasiado cuando se realizan sondeos en áreas despejadas. El ruido por movimiento inducido o microfónia se debe al movimiento de los sensores de campo magnético en el campo terrestre, siendo este último mucho mayor que los usados en los TEM, a este ruido se le conoce como ruido de viento.

## 2.8 Modelado

Los datos obtenidos en campo deben someterse a un proceso para interpretación, es decir, inversión que involucre un medio isotrópico y continuo en función de la profundidad. Ésta consiste, en generar un modelo geoelectrico donde cuya respuesta se asemeje a los datos observados, lo cual se realiza por un método iterativo que se caracterice por estabilidad y converja rápidamente, para poder obtener la estimación de dicho modelo, se debe inferir la respuesta para poder realizar una comparación para el ajuste. De esta manera, se necesita calcular mediante el problema directo la respuesta del modelo generado.

### 2.8.1 Problema Directo

Comúnmente el tipo de bobinas ocupadas en campo son cuadradas o rectangulares, por la facilidad en la adquisición de los datos, aunque teóricamente se hace un análisis con una aproximación entre una espira cuadrada a circular, tomando en cuenta el área de la geometría. Para poder realizar el cálculo del voltaje en el centro de una espira circular con el método de convolución se sintetiza en: transformada de Hankel, transformada inversa de Fourier y corrección de rampas (Flores, 2000).

La primera etapa consta de determinar la componente vertical del campo magnético en el dominio de las frecuencias, la transformada de Hankel (Ryu *et al.*, 1970) se expresa como:

$$H_z(\omega) = \frac{Ia}{2} \int K(\lambda, \omega, \rho_j, e_j) j_1(\lambda) d\lambda \quad (2.45)$$

donde  $I$  es la intensidad de la corriente continua en el transmisor antes del corte,  $a$  es el radio de la espira,  $\lambda$  es la variable de integración,  $K$  es el kernel de la transformada,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $\rho_j$  y  $e_j$  son las resistividades y espesores de las  $N$  capas del modelo y  $J_1$  es la función Bessel de primer orden. El kernel está dado por (Wait, 1962):

$$K(\lambda, \omega, \rho_j, e_j) = \frac{2Y_0\lambda}{Y_0 + \hat{Y}_1} \quad (2.46)$$

Donde  $Y_0 = \frac{\lambda}{i\omega\mu_0}$  es la admitancia intrínseca del aire y  $\hat{Y}_1$  es la admitancia superficial.



Mediante un filtrado digital (Ghosh, 1971) con un cambio de variables la transformada de Hankel cambia a una integral de convolución, y se expresa como:

$$H_j = \sum_i K_{(j-i)} W_i \quad (2.47)$$

donde  $W_i$  define a los coeficientes del filtro asociado a la función Bessel y  $K$  representa al kernel de manera discreta. Para la expresión anterior se corta el proceso cuando el producto de  $K_{(j-i)} W_i$  es menor que el producto máximo multiplicado por un valor de tolerancia definido manualmente (Flores *et al.*, 2000).

Cuando se requiere obtener el voltaje transitorio inducido en la bobina receptora, es necesario transformar  $H_z(\omega)$  al dominio del tiempo, por lo que se recurre a la transformada inversa seno de Fourier en la parte imaginaria del campo magnético:

$$v^e(t) = -\frac{2\mu A}{\pi} \int_0^\infty \text{Im}[H_z(\omega)] \text{sen}(\omega t) d\omega \quad (2.48)$$

donde  $A$  es el área efectiva de la bobina receptora y  $v^e$  es el voltaje en el receptor cuando la corriente que fue inyectada en Tx es un escalón teórico que se apaga en  $t = 0$ . También puede recurrir a la transformada inversa coseno aplicada a la parte real de  $H_z(\omega)$ .

Para la corrección de rampas se toma en cuenta la corriente real del equipo utilizado en la adquisición de datos, donde dicha corriente se caracteriza por ser periódica y tener rampas lineales de ancho  $t_r$ , discrepa de la corriente teórica, la cual no es periódica y tiene rampas con pendiente. Para ello, Fitterman y Anderson (1987) demostraron que  $v^e$  de la corriente trapezoidal es la suma de los efectos de todas las rampas antes del tiempo cero, se expresa como:

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{1}{t_r} \int_{t_a}^{t_a+t_r} v^e(\tau) d\tau \right) \quad (2.49)$$

Donde la integral dentro del paréntesis se define como  $P_i$  y consta de un promedio de  $v^e(t)$  en una ventana de ancho dado por la integral. El formato más común utilizado para la presentación de resultados es el de una función de resistividad aparente definida para tiempos tardíos como (Kaufman y Keller, 1983):

$$\rho_a = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{mA}{20v} \right)^2 \left( \frac{\mu_0}{t} \right)^5 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.50)$$

donde  $m$  define el momento de la espira transmisora.

### 2.8.2 Problema Inverso

La inversión de los datos que realiza el programa Winglink está basada en el algoritmo de Occam, donde dicho algoritmo se propuso por Constable *et al.* (1987), teniendo como ventaja de obtener los modelos suavizados para evitar una sobre interpretación de los datos y las discontinuidades en los mismos, pues considera simplificar la no unicidad de los modelos y el concepto de aspereza. Esto se define como la integral del cuadrado de la primera o segunda derivada de las resistividades respecto a la profundidad  $z$ :

$$R_1 = \int \left( \frac{dm}{dz} \right)^2 dz \quad (2.51)$$

$$R_2 = \int \left( \frac{dm^2}{dz^2} \right)^2 dz \quad (2.52)$$

Para el caso discreto se reescribe como:

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (m_i - m_{(i-1)})^2 \quad (2.53)$$

$$R_2 = \sum_{i=2}^{N-1} (m_{(i+1)} - 2m_i + m_{(i-1)})^2 \quad (2.54)$$

dónde:

$m_i$ : resistividad de la capa  $i$   
 $N$ : número de capas

Además de las ecuaciones anteriores  $m(z)$  puede ser la resistividad o el logaritmo de la resistividad, donde la notación utilizada es la siguiente:

$$m(z) = m_i, z_{(i-1)} < z < z_i, i = 1, 2, \dots, N$$

Donde  $Z_0=0$  y en la práctica  $N$  puede variar entre 20 y 100.

Ahora bien el vector  $M$ , se define como el conjunto de resistividad aparentes y fases en diferentes frecuencias, o resistividades aparentes en diferente espaciamiento, o una única combinación para trabajar la inversión. Además se asume un error  $\sigma_j$  para cada dato, por lo que se evaluara la calidad de los datos de campo utilizando el criterio de mínimos cuadrados ponderados (Constable *et al.*, 1987):

$$X^2 = \sum_{j=1}^M \frac{(d_j - F_j[m])^2}{\sigma_j^2} \quad (2.55)$$

dónde

$F_j[m]$ : función con los parámetros del modelo.

El problema resulta ser no lineal para poder encontrar el modelo a partir de los datos, los cuales se les asocia una incertidumbre, con la finalidad de minimizar  $R$ , por lo tanto que  $X^2$  debe ser mínimo, tomando en cuenta que es imposible que sea cero. Por otra parte, al saber que es un problema no lineal, no se garantiza que exista una única solución. De manera general, la solución es expresada como:

$$d_j = F_j[m] \quad j=1,2,3,\dots, M \quad (2.56)$$

En notación vectorial, podemos obtener que:

$$d = Gm \quad (2.57)$$

Donde  $G$  es una matriz de  $M \times N$  con los elementos del modelo, para este caso de mínimos cuadrados ponderados se puede reescribir la ecuación  $X^2$  como sigue:

$$X^2 = \|Wd - WGm\|^2 \quad (2.58)$$

Donde  $W$  se define como una matriz diagonal de  $M \times M$ :

$$W = \text{diag}\left[\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_M}\right] \quad (2.59)$$

Para poder obtener la mínima rugosidad se utilizan el método de los multiplicadores de Lagrange (Smith, 1974), donde la ecuación de restricción se reordena para tener la expresión igual con cero, se multiplica por un parámetro  $u^{-1}$  y se le añade a la función para ser minimizada. La ecuación queda definida como:

$$U = \|\partial m\|^2 + u^{(-1)}\{\|Wd - WG\|^2 - X^2\} \quad (2.60)$$

Y la rugosidad está representada por el primer término y el ajuste de los datos por el multiplicador de Lagrange es el segundo. Obtener el gradiente de  $U$  con respecto a  $m$  nos indica los valores estacionarios de  $U$  dada una rugosidad (Constable *et al.*, 1987), reescribiendo:

$$\mu^{(-1)}(WJ)^T WJm - \mu^{(-1)}(WJ)^T Wd + \partial^T \partial m = 0 \quad (2.61)$$

Donde  $J$  es el Jacobiano  $M \times N$ , definido como  $J = \nabla m F$ . Por lo que queda resolver el sistema no lineal para  $m$ , para el caso lineal la matriz  $G$  es una matriz de constantes, pero para este caso el Jacobiano está en función de  $m$ . La resolución se puede simplificar escogiendo un operador  $\mu$  de tal manera que la aproximación encaje dentro de la tolerancia deseada, Constable *et al.* (1987) propone el vector siguiente:

$$m_{(k+1)}(\mu) = [\mu \partial^T \partial + (WJ_k)^T WJ_k]^{(-1)} (WJ_k)^T W \widehat{d}_k \quad (2.62)$$

Para el valor de error calculado para el término  $m_{(k+1)}(\mu)$  se tiene:

$$X_{(k+1)}(\mu) = \|Wd - WG_{m_{(k+1)}(\mu)}\| \quad (2.63)$$

dónde:

$\widehat{d}_k$  se define como el vector de datos;  $\widehat{d}_k = d - F[m_k] + J_k m_k$ .

$G_{m_{(k+1)}(\mu)} = F[m_{(k+1)}(\mu)]$

$\partial$  es una matriz MxN definida como:

$$\partial = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3. Antecedentes de la Zona de Estudio

#### 3.1 Ubicación

La zona de estudio se localiza dentro del estado de Baja California, dicho estado está delimitado al norte por los Estados Unidos de América, al poniente por el Océano Pacífico, al sur por Baja California Sur y al este se encuentra el Golfo de California y el estado de Sonora. Está conformado por cinco municipios, y en la región del golfo se tiene un clima desértico con pocas lluvias en verano (SGM, 2013).

El estado está comprendido por dos provincias fisiológicas, la provincia Península de Baja California representada por montañas complejas y el extremo noroeste de la Provincia de Llanura Sonorense representada por planicies aluviales interrumpidas por montañas completas asiladas con orientación al noroeste (Alvarez, 1958). La Provincia Península de Baja California se divide a su vez en dos subprovincias denominadas: Sierras de Baja California Norte, que cubre casi toda la entidad, y Sierra de la Giganta en la porción sureste del Estado. Además se sitúa dentro de una región con gran actividad tectónica, por lo cual el relieve es controlado por dicha actividad, acompañado a los procesos erosivos fluviales y eólicos se tienen como resultados Sierras en bloques que se asocian a planicies marginales, pie de monte, valles y cañadas (CONAGUA, 1999). El área de estudio comprende al poblado de San Felipe, perteneciente al municipio de Mexicali, Baja California (figura 3.1).

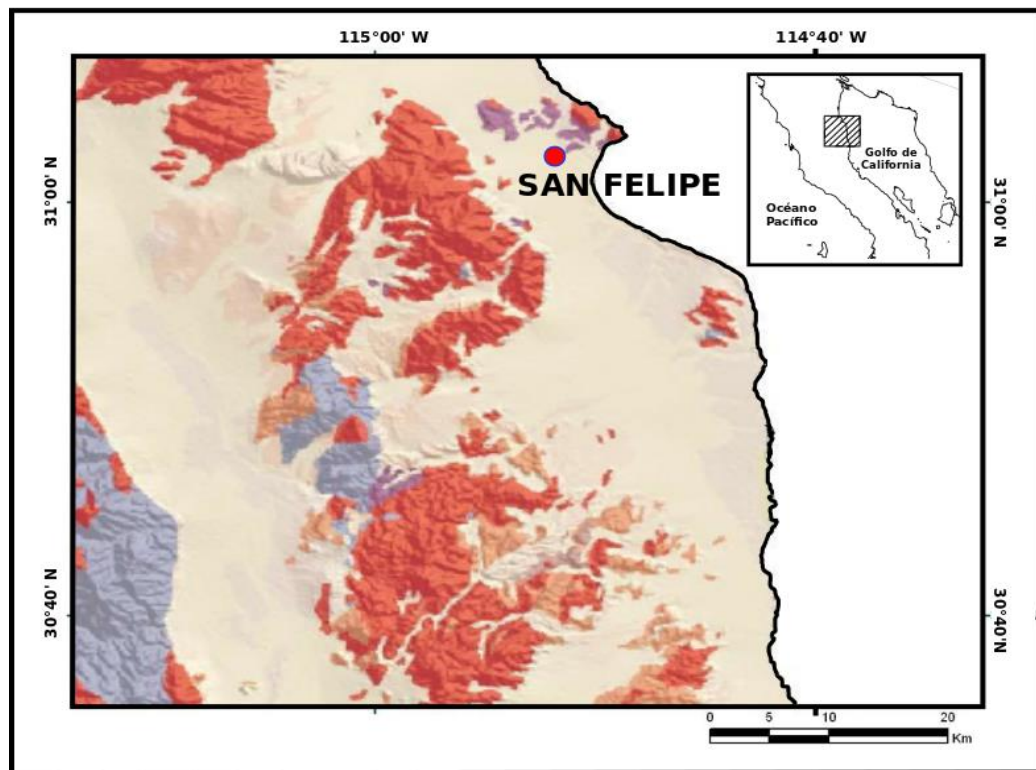


Figura 3.1. Área de interés (SGM, 2015).

La región está constituida por estructuras complejas que se formaron en el Cretácico y mesetas volcánicas del Mioceno, que se vieron afectadas por la apertura del Golfo de California con forma de montañas escalonadas y valles de origen tectónico.

### 3.2 Marco Geológico

En Baja California se encuentran dos provincias fisiográficas del país: Península de Baja California y Llanura Sonorense, figura 3.2. La primera comprende los estados de Baja California y Baja California Sur, es atravesada por una cordillera montañosa con el mismo nombre, Sierra de Baja California, en cuyos flancos se encuentra las llanuras oriental y occidental californianas. La Llanura Oriental es estrecha y se extiende hasta el océano Pacífico a lo largo de la península, por lo que sus playas con pequeñas o inexistentes. Mientras que la Llanura Occidental se extiende a lo largo de la península desde la frontera con Estados Unidos de América hasta Cabo San Lucas. Esta provincia se subdivide en cinco regiones: Sierras de Baja California Norte, Desierto de San Sebastián Vizcaíno, Sierra de la Giganta, Llanos de la Magdalena y Del Cabo, (CRM, 2000).

La Llanura Sonorense es una franja estrecha paralela a la costa, abarcan los estados de Baja California (al noreste) y Sonora, se extiende entre la Sierra Madre Occidental y el Golfo de California, abarca desde el límite con Estados Unidos de América hasta la parte sur del estado de Sinaloa. El espesor de la provincia varía, siendo más ancha hacia el norte y angosta en la parte sur. Se caracteriza por tener cráteres y mesetas de origen volcánico (CRM, 2000). Teniendo tres subprovincias: Desierto de Altar, Sierra del Pinacate y parte de la de Sierras y Llanuras Sonorenses. La subprovincia Desierto de Altar define el extremo noreste del estado de Baja California, hacia la frontera con el estado de Sonora (CONAGUA, 1999).

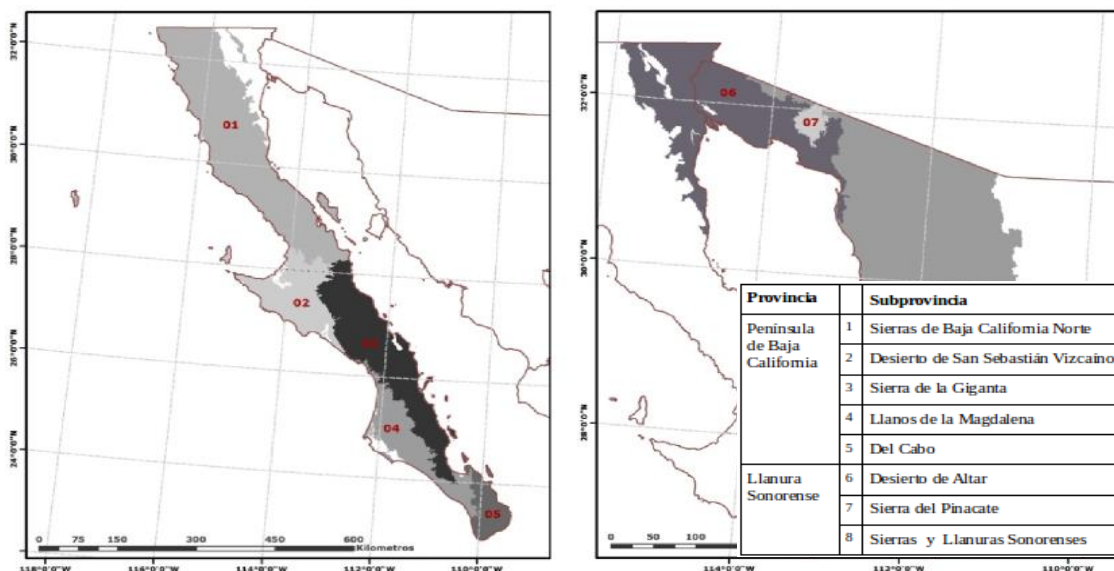


Figura 3.2. Provincias fisiográficas presentes en Baja California (INEGI, 2015c).

### 3.2.1 Geología Regional

En el estado afloran rocas con una gran complejidad debido a la presencia de dos terrenos tectonoestratigraficos diferentes (INEGI, 2015; ver figura 3.3). El primero conocido como terreno de Cortés se encuentra en la región oriental caracterizado por las formaciones Zamora y El Volcán. La formación Zamora contiene las rocas más antiguas representadas por una secuencia metamórfica del Cámbrico interior que constituye el basamento cristalino de la región (esquistos, cuarcitas, gneises, filitas y mármoles), la secuencia presenta grados de metamorfismo que varían desde las facies de esquistos verdes hasta la facies de antifibolitas asociado a plegamientos. La formación El Volcán sobreyace concordantemente sobre ésta (CRM, 2000). En el noreste aflora una secuencia metasedimentaria constituida por esquistos, filitas, pizarras, areniscas, calizas, lomomitas y mármoles que constituyen la Formación El Indio al sureste cubriendo discordantemente las rocas más antiguas (McEldowney, 1970). El terreno representa la extensión más occidental del cratón norteamericano que durante el Neogeno se separó del continente y hubo un fallamiento lateral que dio lugar al Golfo de California.

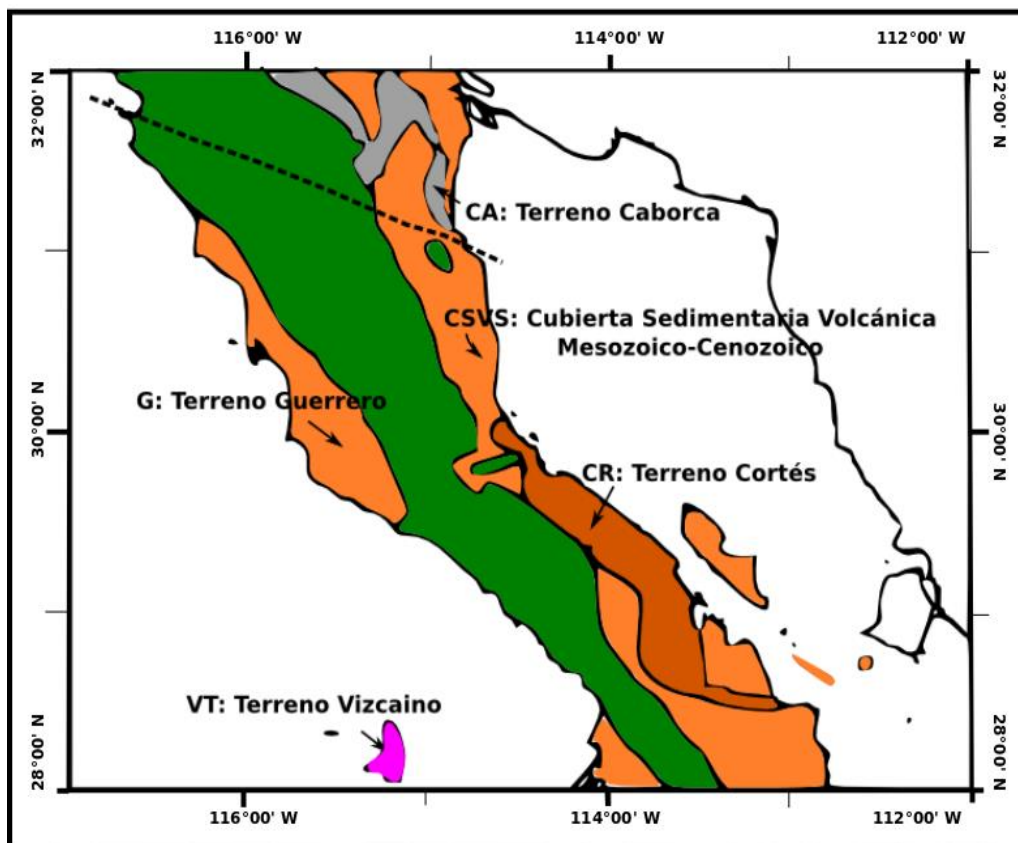


Figura 3.3. Terrenos tectonoestratigraficos del Estado de Baja California (SGM, 2015).



Por otra parte el terreno de Alisitos se localiza en la porción occidental, la cual es representada por secuencias de arco del Triásico al Cretácico, constituida por series volcanosedimentarias con presencia de metamorfismo regional de facies de esquistos verdes. La primera secuencia de edad Triásica-Jurásica inferior consiste en gneis y esquistos mientras que la de menor edad se denomina Grupo Alisitos de edad Aptiano-Albiano, que se presenta como colgantes sobre el batolito y aflora en la porción sureste del estado, compuesta por cuatro unidades litológicas constituidas por rocas metasedimentarias, metavolcanicas, andesitas, brechas andesíticas y calizas. Siendo que las metasedimentarias afloran en la porción sureste de la Sierra San Pedro Mártir, formadas por esquistos, filitas, pizarras y hornfels, presentando además metamorfismo regional de facies de esquisto verde. Las rocas metavolcanicas por su parte sobreyace discordantemente sobre las metasedimentarias, su composición es andesítica y afloran en la porción sur del cerro La Costilla y al Norte del Rancho el Potrero. El contacto superior es concordante con las andesitas y brechas andesíticas, cubriendo o intercalándose con esta unidad (Campa y Coney, 1983).

Durante el Cretácico Superior – Terciario Inferior, las rocas preexistentes fueron afectadas por intrusivos de composición granítica, granodiorítica, tonalítica y diorítica, que en conjunto constituyen el Batolito Peninsular de Baja California, ligado a la evolución del arco volcánico del Jurásico Tardío- Cretácico. Estas rocas están cubriendo principalmente las sierras de San Pedro Mártir, San Felipe y San Miguel (Gastil, 1993).

Durante el Paleoceno existió un evento volcánico que dio origen a andesitas que sobreyacen discordantemente a las rocas metamórficas de edad paleozoica, afloran en las Sierra Las Pintas en la parte norte. Durante el Mioceno se depositaron rocas volcánicas y sedimentarias que sobreyacen discordantemente a las unidades preterciarias. Las rocas volcánicas pertenecen a dos probables periodos, el primero produjo andesitas y dacítas andesíticas al norte del estado. El segundo periodo origino derrames de tobas riolíticas y riolitas, riolitas y tobas riolíticas y, tobas riolíticas y andesíticas. Dichas rocas pertenecen a la secuencia volcánica Sierra de Las Pintas (Leie *et al.* 1993).

Durante el Plioceno se depositó un conglomerado polimíctico con intercalaciones de areniscas que sobreyacen en discordancia angular a las areniscas del Mioceno, siendo los afloramientos más amplios en la costa oeste del Mar de Cortés. Por otra parte hubo movimientos epirogénicos en el Plioceno-Pleistoceno, que originaron conglomerados, areniscas, terrazas y gravas presentes a lo largo de toda la costa. Siendo para la cúspide los depósitos del Holoceno de tipo eólico, aluvial, lacustre, palustre y litoral.

Para el estado se conocen dos principales eventos tectónicos orogénicos que han afectado a la región, tienen su inicio cuando la margen del cratón norteamericano en el Paleozoico estaba situado en la actual Península de Baja California. El primer evento ocurrió en el



Durante el Mioceno medio y el Plioceno ocurrió un cambio en el límite de placas Pacífico y Norteamericano, que involucró varios procesos tectonomagmáticos en una zona amplia del margen continental de Norteamérica, ocasionados por el cese de la subducción de la placa Farallón-Guadalupe (Atwater, 1989; Stocks y Hodges, 1989), lo cual provocó desplazamientos transformantes dextrales y fallamiento normal, lo que provocó la apertura del Golfo de California. Se presentan rasgos estructurales bien definidos que corresponden a fallas laterales dextrales y normales, y estructuras circulares originadas por las consecuencias de los intrusivos granodioríticos, tonalíticos y dioríticos. La distribución de rocas en el estado se puede ver en la figura 3.4.1.

### **3.2.2 Estratigrafía**

Como se ha mencionado el contexto de la región corresponde a unidades litológicas que varían desde el Paleozoico hasta el Holoceno (figura 3.4.2), se describen brevemente a continuación:

#### **Paleozoico**

Son las rocas más antiguas de la península de Baja California y sus afloramientos se encuentran distribuidos al oeste de la ciudad de Mexicali y consisten en gneis, cuarzo-feldespático con incrustaciones de mármol, al Sur de la Sierra Cucapas, además se encuentran filitas y esquistos, al norte de Sierra Pintada se reportan pizarras, filitas, calizas y esquistos micáceos (McEldowney, 1970). Al sur de Sierra Santa Isabel aflora una secuencia de esquistos, gneises, cuarcitas y mármol. Hacia la costa del Golfo de California, cerca de la bahía Calamujé, se encuentran afloramientos de rocas calcáreas metamorfizadas intercaladas con cuarcita. Y se representa por las formaciones El Volcán y Zamora de Carbonífero-Pérmico.

#### **Mesozoico**

Está constituida por rocas metamórficas del Triásico Inferior y Triásico Superior con Jurásico inferior, representada por la formación El Indio, que cubre discordantemente las formaciones del Paleozoico, constituida por esquistos alterados y gneis, como estructuras colgantes circundando el batolito de Sierra San Pedro Mártir. Se presenta otra formación que descansa discordantemente sobre las formaciones El Volcán, El Indio y Zamora, conocida como La Olvidada, que está asociada a la evolución del arco volcánico Alisitos.

Las rocas del Cretácico Inferior constituyen la roca encajonante al occidente del Batolito Peninsular (Beggs, 1983-1984) Para el Cretácico Superior se depositó una secuencia clástica en un ambiente mixto, conformado por conglomerados polimícticos, areniscas y limolitas intercaladas, las cuales constituyen a la formación El Rosario.

## Cenozoico

Para el Cenozoico la cordillera peninsular continuó erosionándose, por lo que los depósitos se acumularon al occidente de la península interdigitándose con los depósitos marinos someros. En el flanco opuesto la acumulación se debió a la subducción de la placa farallón, además el arco volcánico se desplazó hacia oriente, permitiendo una sedimentación relativamente continua, para el Mioceno Tardío y Plioceno el cese de la subducción de la placa Farallón-Guadalupe origino un cambio de configuración en el límite de las Placas Pacifico y Norteamérica, aunado a la migración de la placa Rivera, se presentó la apertura del Golfo de California (Atwater, 1989; Sock y Modges, 1989). Durante este periodo se desarrollaron procesos volcánicos en el margen de la península, siendo predominantemente alcalino y de composición riolítica-andesítica y un vulcanismo bimodal riolítico-basáltico.

### **3.2.3 Geología Estructural**

La deformación presente en el estado se debió a un cumulo de situaciones desde tectónicas hasta volcánicas, el plegamiento de las rocas se dio en tres etapas; la primera con pliegues sinclinales cerrados y recostados, e involucra a las rocas metamórficas del mesozoico y paleozoico, con fallamientos normales y desplazamiento laterales. En la segunda etapa se ven pliegues de fondo con un radio pronunciado de curvatura que corresponden a una etapa de distensión, durante El Cretácico Superior, se refleja la discordancia entre las rocas sedimentarias de la formación Rosario y la secuencia del arco insular, siendo la responsable del plegamiento, del metamorfismo y de los emplazamientos batolíticos; además se generó el lineamiento estructural Santillan-Barrera, provocando un gran levantamiento de la región. Y para la última etapa de deformación fue originada por esfuerzos de tensión durante el Terciario Superior y se relaciona con la apertura del golfo de California y la traslación de la península hacia el Noroeste, se presentan fallamientos con desplazamiento lateral, orientados NW-SE, las intrusiones del Cretácico Superior originaron vasculamientos con fallamientos normales orientados NS. Las estructuras circulares se presentan en diferentes localidades correspondientes a intrusivos, calderas y volcanes (CRM, 2000).

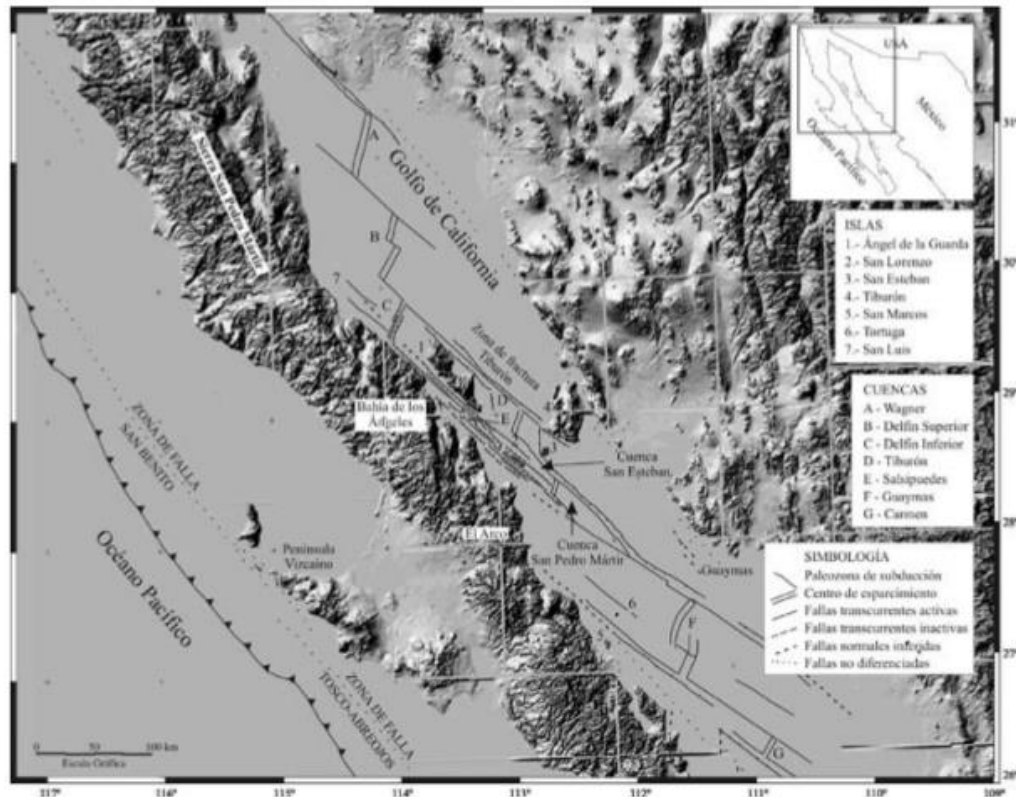


Figura 3.5. Geología estructural de Baja California, (Lonsdale, 1989; Delgado-Argote, 1996; Lewis, 1996).

### 3.3. Geología del Subsuelo

Dadas las geomorfología del área se presenta una planicie que no rebasa los 200 m de elevación, mostrando un aumento de esta hacia el Oeste, pues se acercan a las Sierras de San Felipe y Santa Rosa. Las características del valle desde la Sierra hasta la costa predominan los materiales aluviales y eólicos, con edad del Holoceno, ver figura 3.6. Al norte de área se encuentra una zona metasedimentaria del carbonífero-Pérmico (Ms), con metamorfismo regional de facies de esquisto verde (estauroлита, filitas, pizarras, areniscas, hornfels y mármol), pertenecientes a las formaciones El Volcan y Zamora (Leier-Engelharde, 1993).

Los depósitos aluviales (Da) se encuentran constituidos por gravas, arenas, arcillas y limos sin consolidar, producto de la erosión e intemperismo de las rocas preexistentes dentro de la unidad de aluviales del cuaternario se incluye a los colubiones, suelos arenosos y suelos arcillo-arenosos, y suelen presentarse en forma de terrazas y abanicos. Mientras que los depósitos de arena de grano fino y medio, con cuarzo, feldspatos y fragmentos de conchas como producto del viento (CONAGUA, 1989). Estos depósitos forman parte de los sedimentos depositados como el último evento sedimentario del cuaternario, con un espesor variado entre 100 y 300 m.

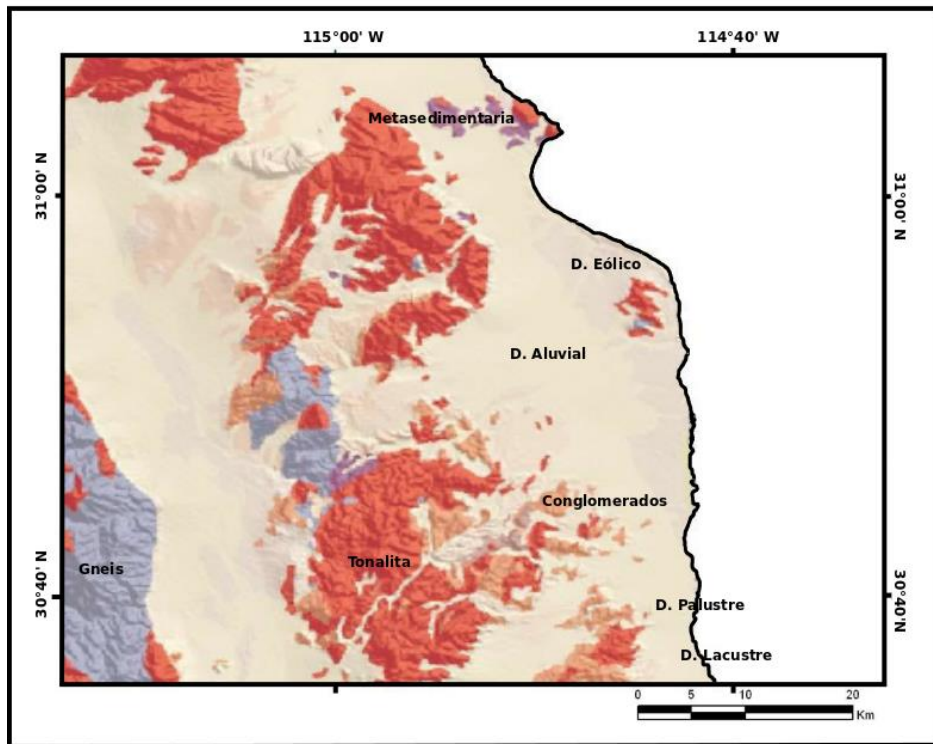


Figura 3.6. Geología del Valle de San Felipe, Baja California (SGM, 2015; CONAGUA, 2008).

Para ambos tipos de formación antes mencionados presentes en la zona de estudio se infiere una permeabilidad de media a alta. Los aluviones están constituidos por suelos de composición arenoso-gravosa de color café rojizo, con clastos de forma subangulosa, se presentan también puntos de suelo arcilloso-arenoso con detritos de basalto y tonalitas. Por otra parte, la porción eólica (De) está constituida por suelo arenoso de color crema, formado por dunas de arena de grano muy fino. Hacia los pie de sierra se encuentran conglomerados que provienen de partes altas, mezclándose con las areniscas (CONAGUA, 1989).

Para las partes altas de la sierra se encuentran rocas ígneas intrusivas ácidas como tonalitas con feldespatos, cuarzo y minerales mágicos, teniendo como función ser colectores del agua de lluvia que posteriormente se traslada al valle. Los conglomerados polimícticos (Cp) al sureste del valle presentan un color gris oscuro con tonos rojizos, con fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, bien redondeadas, las cuales están cementadas por material arcilloarenoso, se encuentran mal consolidados consecuencia de la erosión de la región (CONAGUA, 1989).

En la región de Punta Estrella se encuentran rocas metamórficas de gneis-esquistos, del Triásico Superior-Jurásico Inferior, los gneis son de tipo ortonesis con coloración café rojizo, compactas, con textura granoblástica y una foliación modelada, presentándose como techos

colgantes debido a los batolitos que los intrusionaron. Mientras los esquistos presentan una coloración gris oscura, compactas y con estructura lepidoblástica con esquistosidad, estas rocas se encuentran emplazadas por diques aplíticos y pegmatíticos, presentando vetillas de cuarzo paralelos a la foliación. Se encuentran también rocas Granodiorita-Tonalita y Granodiorita-Granito, las primeras son rocas de color blanco a gris y tonos oscuros, con xenolitos de diorita, la estructura que presentan es masiva compacta con textura fanerítica de grano medio a grueso, presentan intemperismo, en el segundo grupo las rocas son de color gris claro, masivas de grano fino a medio, se encuentran intrusionadas por diques pegmatíticos, estas últimas en la región noreste del Valle de San Felipe (CRM, 2000).

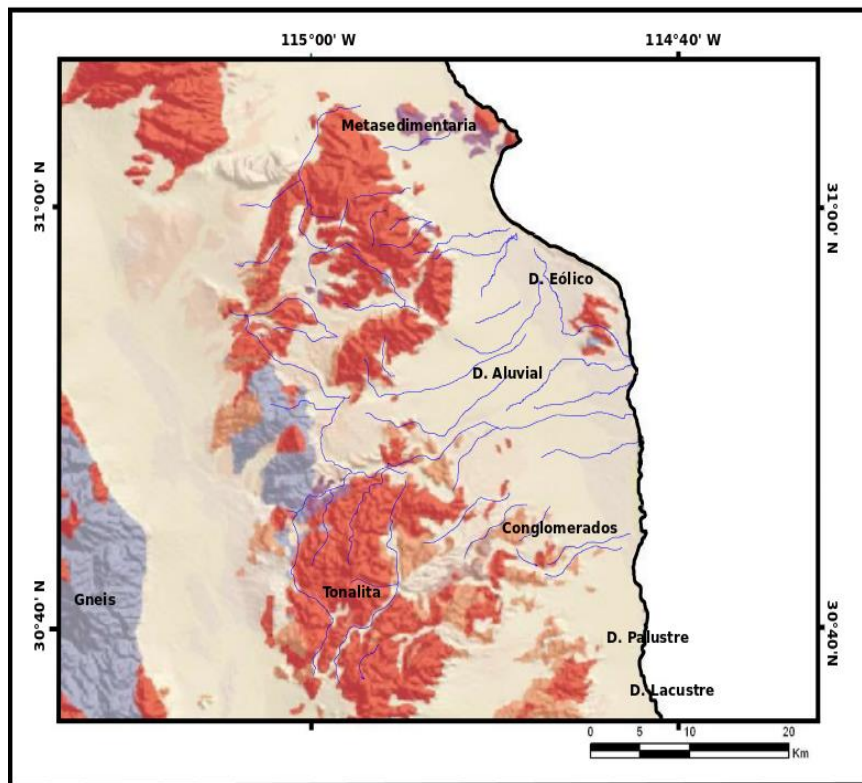


Figura 3.7. Principales afluentes en el Valle de San Felipe, Baja California, (SGM, 2015; INEGI, 2015b).

En la región de Bahía Santa María se encuentran depósitos palustres de arcillas, limos y arenas en forma de estratos delgados sin consolidar, hay presencia de material orgánico, la coloración de los depósitos es gris oscura (CRM, 2000).

En algunos sitios particulares existen basaltos con olivino alterado, la estructura que los caracteriza es la amigdaloides y pueden tener una permeabilidad de baja a media debido al fracturamiento que presentan. Además, los esquistos encontrados ocupan una región de espacio reducido y consiste de Wollastonita asociada con rocas volcánicas y pizarras (CRM, 2000).

La geología estructural del área cuenta con fracturamiento, fallamiento y plegamiento en rocas sedimentarias, las fallas en su mayoría son normales y algunas con desplazamiento horizontal izquierdo. La principal fuente hidrológica del valle se representa por arroyos provenientes de las zonas altas, Sierras Santo Rosa y San Felipe, los más importantes arroyos de la región son: El Huatamote y Las Amarillas, Don Poncho, Parra y Percebe, con dirección suroeste-noreste, desembocando en el Golfo de California, en la figura 3.7 se presentan los principales flujos hidrológicos que afectan el Valle de San Felipe (CONAGUA, 1989).

A falta de información estratigráfica del lugar, se hace referencia a la columna estratigráfica más cercana al sitio, de la cubierta volcano-sedimentaria, ver figura 3.4, lo más palpable del lugar son los levantamientos realizados por CONAGUA, con los cuales se infiere un espesor de sedimentos de aproximadamente 300 m para los últimos 0.1 Ma en el Valle de San Felipe.

### **3.4. Hidrología**

El área de estudio se encuentra con características geológicas que indican mantos de agua subterránea que se clasifica como aluviones de relleno depositados y acumulados en las porciones de topografía baja. Los sedimentos presentes están constituidos de gravas, arenas y arcillas que fueron depositadas por las descargas de materiales acarreados por afluentes de agua con desembocadura en el valle y planicie.

El acuífero (figura 3.8) se encuentra colindando al norte con el acuífero El Chinero, al oeste con Vale el Chico-San Pedro Mártir, al sur con Matomí Puertecitos y al este con el Golfo de California (CONAGUA, 1989). Por lo que el acuífero se encuentra en la Región Hidrológica No. 4, denominada Baja California Noreste Lagunas Saladas, e incluye a la cuenca Arroyo Agua Dulce – Santa Clara y a las subcuencas hidrológicas Arroyo Huatamote, Rancho Escolane-Rancho Las Villegas y la poción norte de El Camelo-Zamora.

Además se conoce que en el Valle Chico existe una serie de arroyos como el Parral, La Gringa y Berrendo, que se unen en la porción central del valle y confluyen hacia la región central de la sierra de San Felipe, en donde dan lugar al arroyo Huatamote, por lo que de forma superficial se establece una comunicación entre el Valle Chico y el Valle de San Felipe (CONAGUA, 1989). Los arroyos La Amarillas, Huatamote, Don Poncho, Parra y Percebe; dentro del área de interés, son de tipo intermitente, que circulan de Suroeste-Noreste. Dada la geomorfología del lugar el acuífero se encuentra enmarcado, dentro de un conjunto de

Sierras y Valles producto de procesos tectónicos, sus formas son principalmente rectangulares en las que su eje mayor está orientado de norte a sur, identificándose tres unidades: Sierras, Lomerios y Planicie Costera (CONAGUA, 2008).



De acuerdo con la geología del subsuelo y las características de las unidades litológicas que lo conforman, se define como un sistema heterogéneo y anisótropo, de tipo libre, conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente. Los depósitos granulares son los que se explotan actualmente, las unidades litológicas están afectadas por fallas y fracturas que en algunas ocasiones aumentan su permeabilidad (CONAGUA, 2008).

Se observó que para el período 1989 y 2007 la profundidad del nivel estático varía entre 5 y 85 m, localizándose las mayores profundidades en la porción sur-oeste del valle de San Felipe.

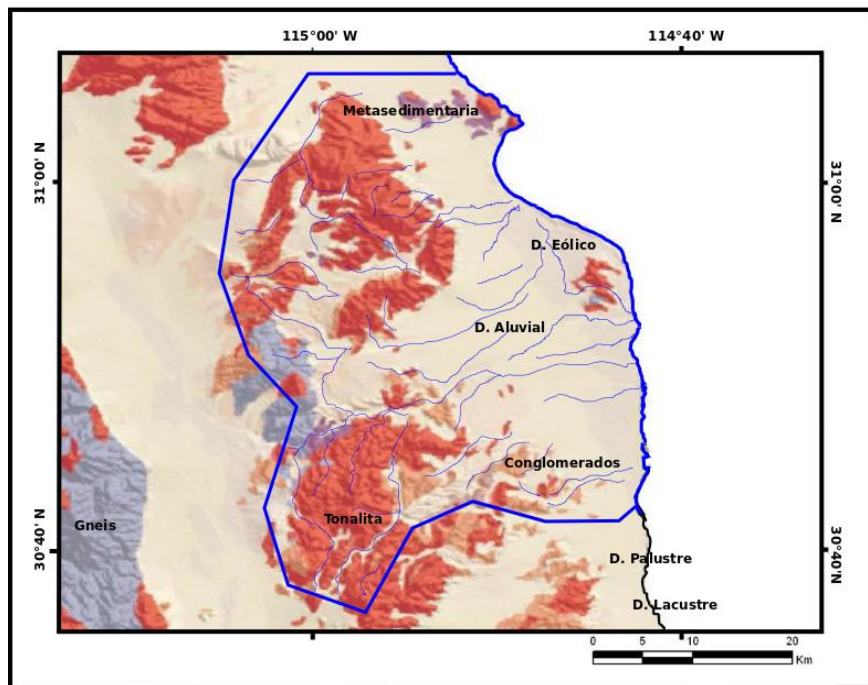


Figura 3.8. Acuífero San Felipe-Punta Estrella (SGM, 2015; INEGI, 2015b; CONAGUA, 2008).

## 4. Implementación de Campo y Adquisición de datos.

Para los sondeos se utilizó un arreglo de bobina simple (ver figura 2.1) para la adquisición de los datos, como se mencionó antes, este arreglo consiste en una bobina que tiene como función ser transmisora y receptora, intercálándose en periodos de tiempo para poder realizar las mediciones. Como ventajas se asegura una mayor profundidad de penetración y un mejor acoplamiento a los cuerpos conductores. Como desventaja se tiene que no es tan sensible lateralmente para las variaciones de resistividad.

Para el levantamiento de datos en campo se utilizó un equipo TerraTEM (figura 4.1), de Monash GeoScope, distribuido por Alpha Geoscience, el cual actúa como transmisor y receptor, la consola contiene un CPU Pentium-III, una pantalla de 15" LCD con pantalla táctil, un transmisor con capacidad de 10A, un receptor con ganancias fijas, un sistema interno con circuito de prueba, un módulo para GPS. El transmisor proporciona una salida  $\approx 24V$  nominal de hasta 10 A para ventanas de tiempo elegibles por el usuario, con la opción de inyectar el nivel de corriente óptima. El receptor puede ser de una única bobina o una múltiple con amplificador, con la opción de ingresar más receptores externos de ser necesario, con 500Hz de 3 canales. Cuenta con memoria interna de 1Gb, puerto USB. El rango de operación para temperatura es de:  $-10$  a  $40$  °C.

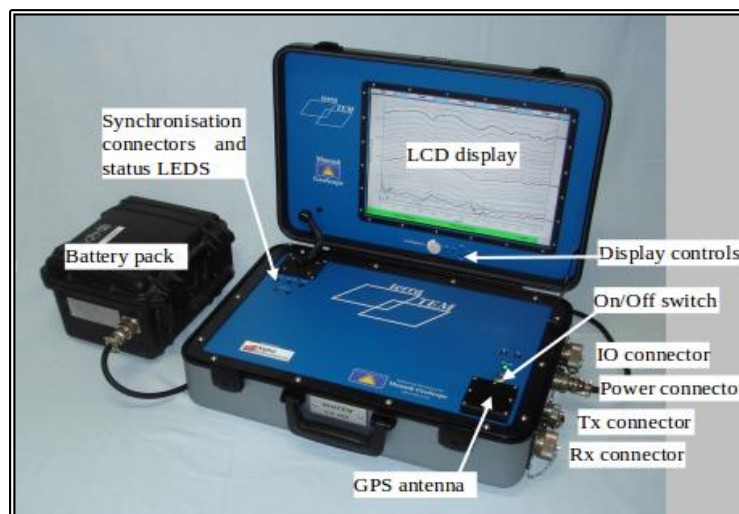


Figura 4.1. Equipo de trabajo TerraTEM.

Se utilizó un cable calibre 20 para la bobina cuadrada, con dimensiones de 50x50 m, cubriendo un área de 2,500 m<sup>2</sup>, se logró inyectar para todos los sitios una corriente que se aproximaba a los 9 A, utilizando 24-25V en la batería, garantizando una considerable profundidad de investigación en la zona.

Se realizaron mediciones de entre 30 y 65 ventanas de tiempo, con la serie de tiempo Early Time del equipo TerraTEM, las mediciones para cada sitio se hicieron con ganancias de: 1, 16, 100 y 1,000. Por lo que se tienen cuatro series de tiempo por cada sitio, la calidad de los datos fue de media a alta, por lo que se esperan buenos resultados.

La localización de los sondeos electromagnéticos cubrió en su mayoría el Valle de San Felipe, realizando 17 levantamientos en total, ver figura 4.2.

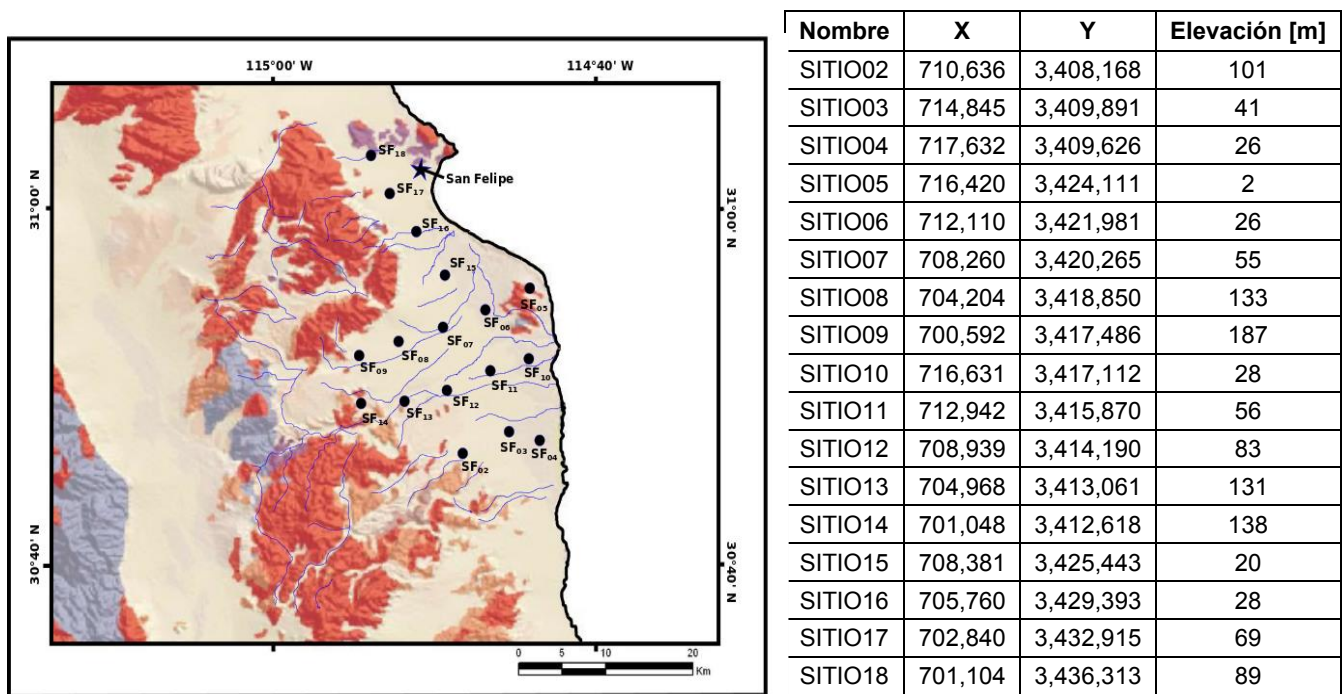


Figura 4.2. Localización de los sondeos TEM y tabla con coordenadas de los sitios.

## 5. Análisis y Procesamiento de Datos

### 5.1. Procesamiento

Para realizar el análisis de los datos adquiridos, se procede a extraer los archivos *.sir* generados con el equipo TerraTEM, obteniéndolos mediante la conexión de la consola del equipo. A los datos de cada archivo se les realizará un análisis estadístico con ayuda del software TEMIXS. Con este programa se obtienen las curvas de decaimiento de voltaje para cada sitio, constará de realizar una edición de datos tomados de las diferentes series de tiempo (diferentes ganancias) y generar una curva promedio de cada conjunto de datos (figura 5.1.). Para realizar esto, se edita la información de cada corrida (ganancia), quitando valores altos o datos con valor nulo, conservando con mayor seguridad aquellos que tienen la misma tendencia en la curva de decaimiento de voltaje. La curva que resulta se le conoce como curva de resistividad aparente en función del tiempo, la cual es procesada con el software WingLink. Por lo que, se procede a exportarlos los datos de TEMIXS en archivos con extensión *.tex* y cargarlos a WingLink.

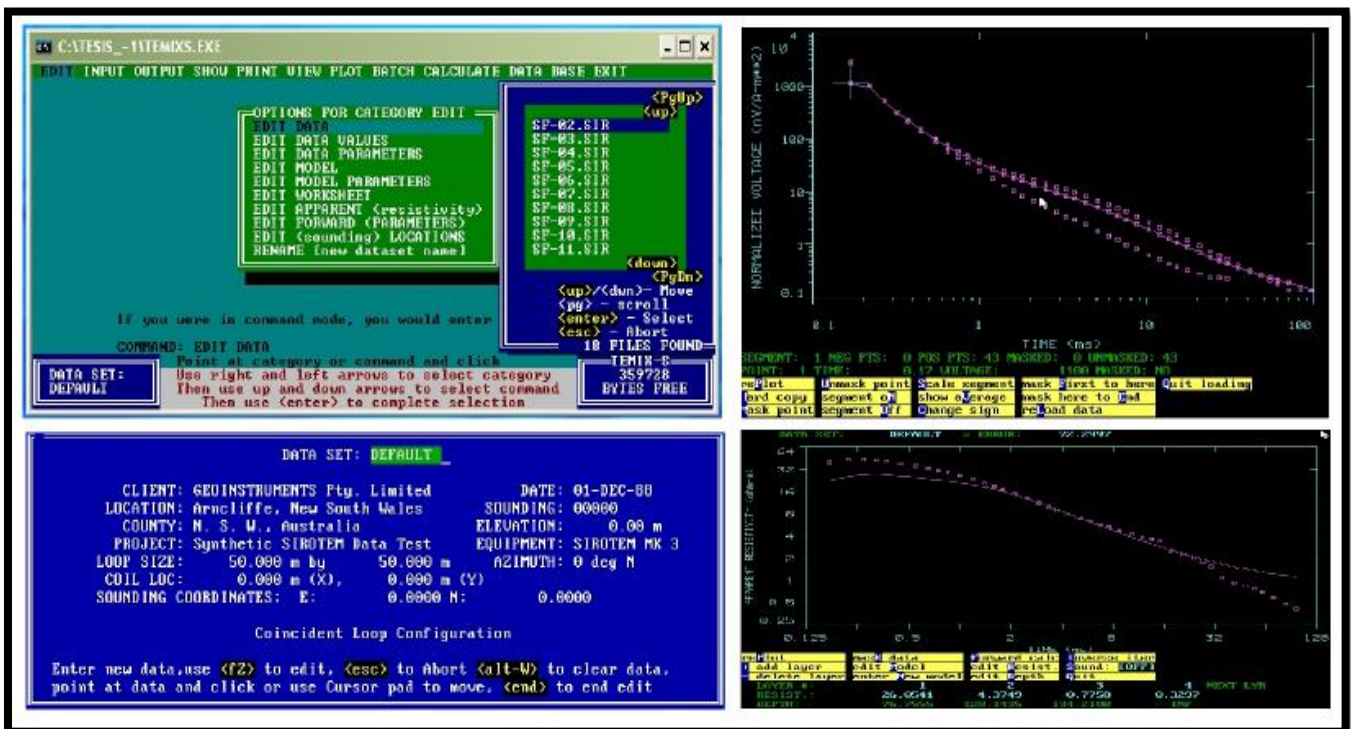
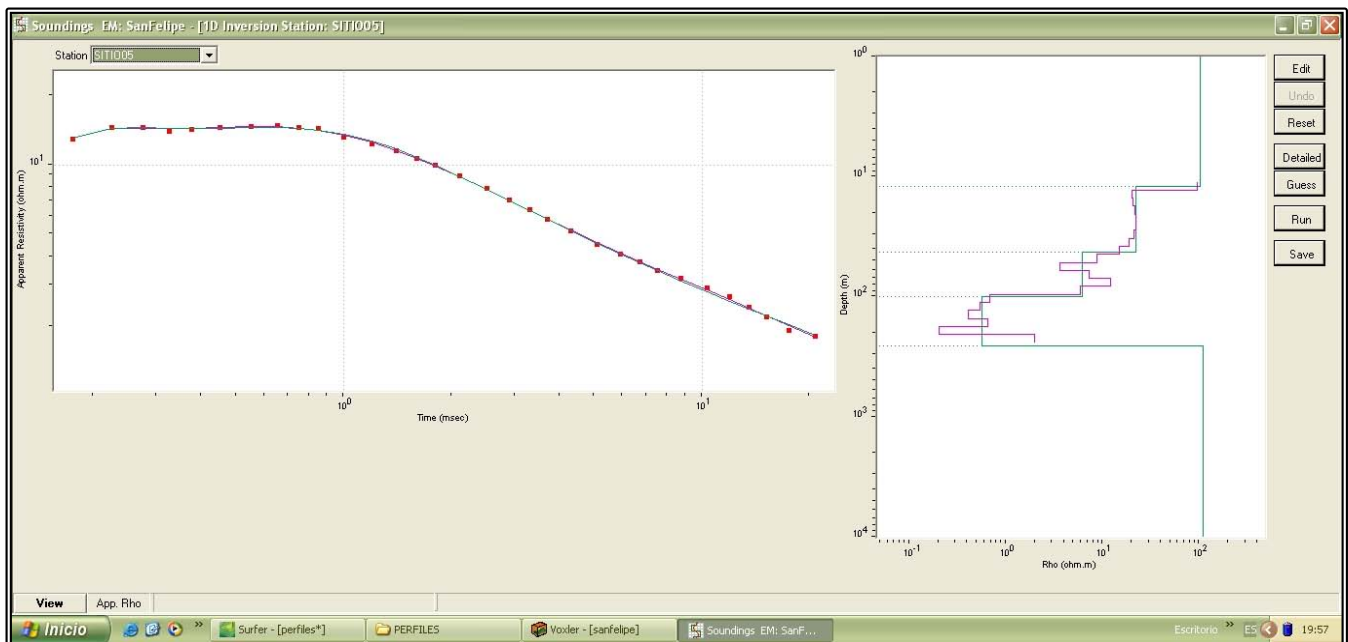


Figura 5.1. Procedimiento para la obtención de las curvas de resistividad aparente (software de proceso TEMIXS).

Se crea una base de datos con el tipo de información que se va a importar, se cargan las curvas de resistividad aparente con los datos respectivos de cada sitio (nombre, coordenadas y elevación) en WinkLink. En primera instancia para la obtención de un modelo 1D, de resistividad contra profundidad, se realizaron pruebas con un parámetro inicial de n capas, y un rango de resistividades (inicial y final), lo cual permite ver los puntos de inflexión que presenta la curva y poder realizar una mejor aproximación del modelo, una vez esto, se realiza una etapa de procesado, donde para cada curva de resistividad aparente se le aplica un algoritmo de inversión de Occam para la obtención de un modelo multicapas. Tomando en cuenta las inflexiones, la pendiente y los tiempos en los que ocurren las inflexiones de la curva de campo.

El modelo estratificado que resulta de la inversión puede ser manipulado para mejorar la calidad del ajuste de curvas, lo cual permite apreciar y estimar en dicha manipulación la profundidad de investigación lograda para cada sitio (figura 5.2). Para la información recabada, se tiene una profundidad de investigación entre 150 y 200 metros. Una vez obtenidos los modelos 1D para los 17 sondeos (ver anexos) se realizaron cuatro perfiles de interés, con el fin de generar secciones de resistividad. Tres de ellos tiene una dirección noreste-suroeste y el cuarto semi-perpendicular a los tres primeros (figura 5.3).



**Figura 5.2. Muestra del Sitio 5 con la obtención de modelo suavizado 1D y modelo de capas con Winklink.**

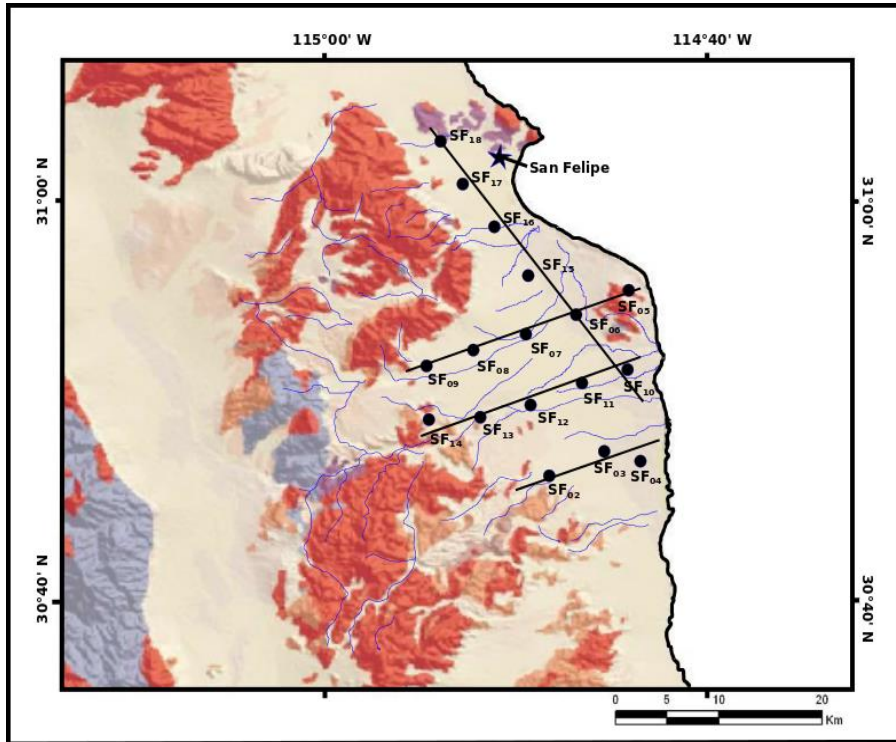


Figura 5.3. Distribución y localización de los perfiles propuestos en el área de estudio (SGM, 2015).

En la figura 5.3 se puede observar la localización de los perfiles geoelectricos propuestos, los cuales se analizan con el software Winglink.

## 5.2. Análisis

Con la obtención de los modelos geoelectricos se generaron cuatro perfiles, que describen tres unidades geoelectricas, ver tabla 5.1.

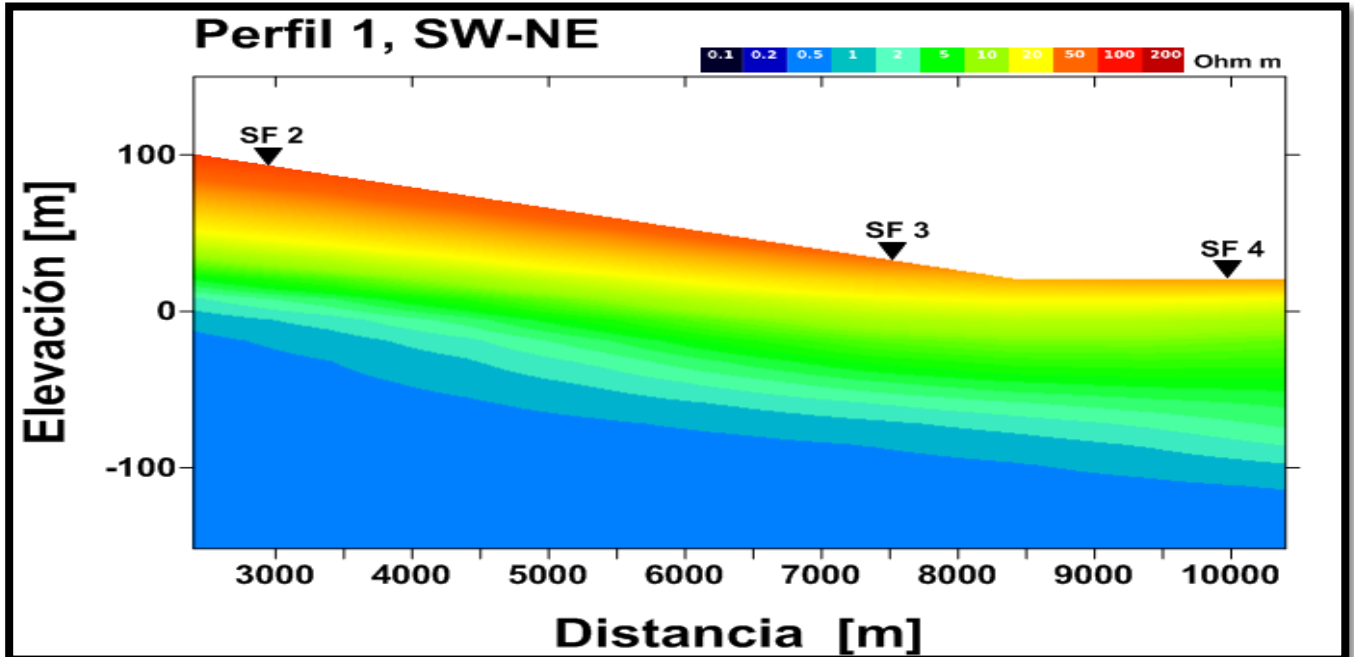


Figura 5.4. Perfil geoelectrico 1. Valle de San Felipe, Baja California.

En el primer perfil, conformado por tres sondeos transitorios electromagnéticos, se observan tres unidades geoelectricas diferentes a lo largo de sus 8 km. En la parte más somera del perfil es posible observar la unidad U1, una capa de alta resistividad que manifiesta valores mayores a los 50 Ohm-m. Dicha capa presenta un cambio lateral de espesor, manifestándose su mayor potencia hacia la zona occidental del perfil, de aproximadamente 30 m, y su mínimo espesor hacia la zona más oriente, aproximadamente de 10 m. La segunda unidad U2, que subyace a la unidad U1 presenta un espesor máximo aproximado de 40 metros, dicha capa presenta una semi-horizontalidad, con un cambio de espesor de 30 m hacia la zona este del perfil, entre los sitios 3 y 4. La unidad U2 presenta una resistividad entre los 10 y 50 Ohm m. Para la tercera unidad U3 que subyace a la unidad U2, se subdivide en las unidades U3A y U3B, con resistividades entre 5 y 10 Ohm-m y menor a 5 Ohm m, respectivamente. La primera de ellas se encuentra en promedio a una profundidad de 80 metros, con una máxima potencia aproximada de 30 metros hacia el este del perfil, dicha capa presenta una disminución en su espesor en 10 m hacia la zona poniente, por debajo del sitio 2. Mientras que, la unidad U3B cuyo espesor no se puede conocer dadas las condiciones y características en la adquisición de los datos, presenta resistividades menores a los 5 Ohm m. Por lo que en general, el modelo tiene un comportamiento de menor a mayor conductividad conforme aumenta la profundidad.

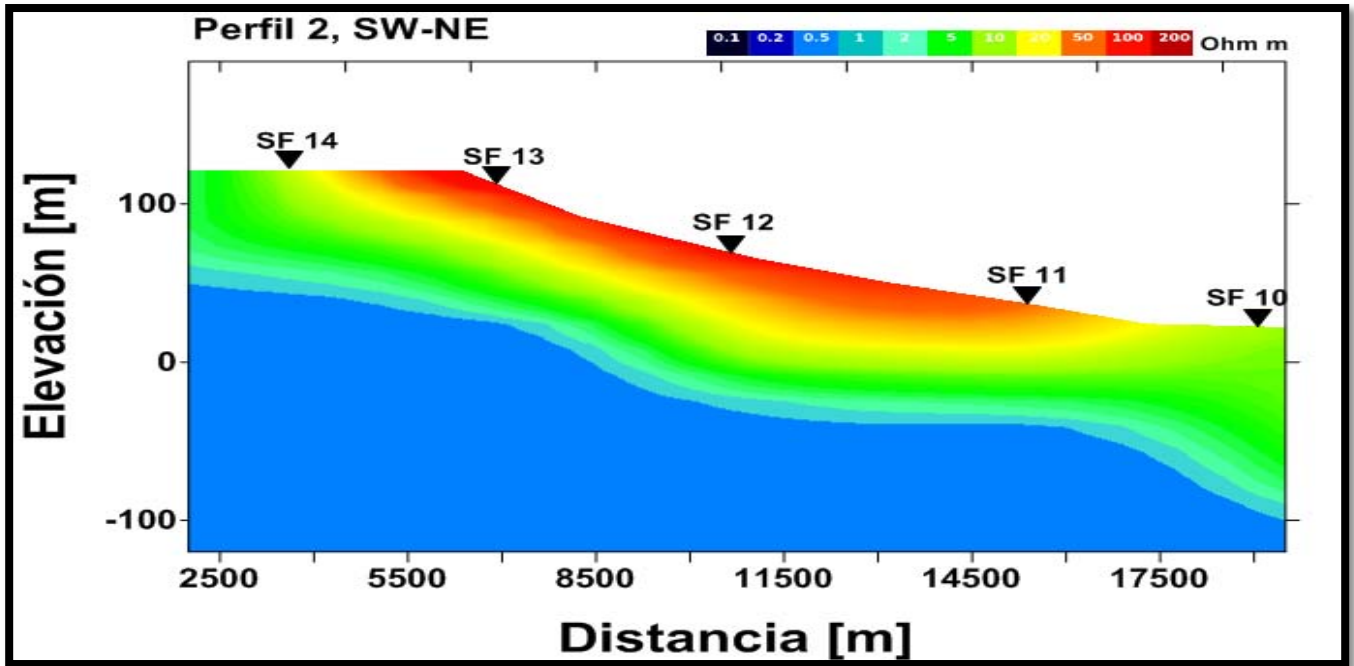


Figura 5.5. Perfil geoelectrico 2. Valle de San Felipe, Baja California

El perfil dos considera cinco sondeos transitorios electromagnéticos, cubriendo una distancia de 16 km, de la misma manera, es posible apreciar las unidades geoelectricas descritas con anteriormente. Siguiendo el mismo orden se puede observar en la parte más somera del perfil la unidad geoelectrica U1, que presenta una resistividad superior a los 50 Ohm-m y su máxima potencia aproximada es de 30 m hacia el centro del perfil, dicha unidad manifiesta una disminución de espesor hacia ambos flancos, y no es claramente apreciable en los sitios 10 y 14. La unidad U2 subyace a la primera unidad, presentando su máximo espesor de 25 m en los flancos del perfil, donde la primera unidad presenta su mínima potencia, se observa una resistividad entre los 10 y 50 Ohm m. Mientras que para la unidad U3 situada por debajo de la unidad U2 presenta una disminución en profundidad hacia los extremos del perfil, donde la capa U3A muestra su máxima potencia de 40 m en la parte este del perfil y su mínimo espesor de dicha subunidad se aprecia en la zona central del perfil donde alcanza aproximadamente los 20 m de espesor. Por otra parte, la subunidad U3B presenta un comportamiento geoelectrico parecido, es decir, la encontramos a una mayor profundidad por debajo del sitio 10, ocurriendo lo contrario hacia el sitio 14 donde se logra apreciar a una menor profundidad, el comportamiento del perfil es ascendente en conductividad conforme la profundidad disminuye.



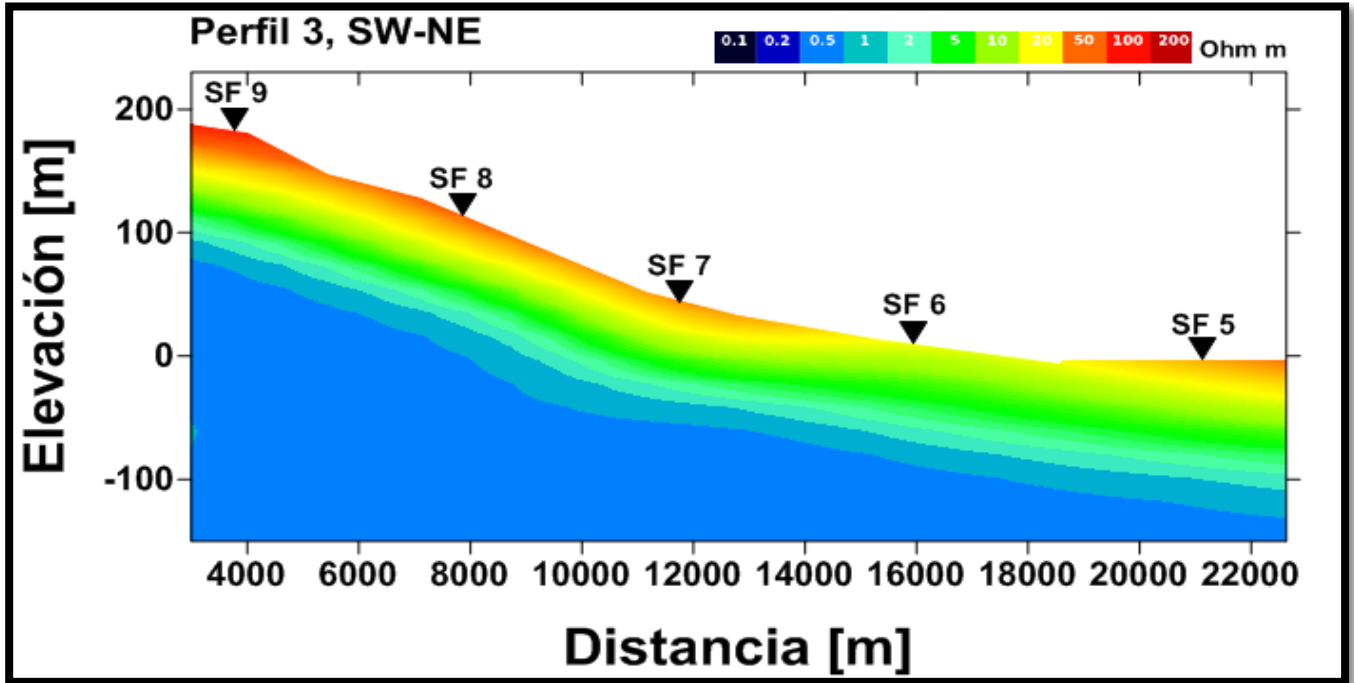


Figura 5.6. Perfil geoelectrico 3. Valle de San Felipe, Baja California

Para el tercer perfil conformado por cinco sondeos transitorios electromagnéticos a lo largo de 17 km. En la región más somera se observa que la unidad U1 no se presenta de igual manera en el perfil, es posible apreciar que su mayor potencia se encuentra en la zona más occidental, de aproximadamente 30 m, y su mínimo espesor se aprecia en las cercanías del sitio 6, de aproximadamente 10 m, disminuyendo del sitio 7 en dirección al sitio 6 y aumentando nuevamente del sitio 6 en dirección al sitio 5. La unidad U2 presenta un valor de resistividad entre los 10 y 50 Ohm-m subyaciendo a la unidad U1, dicha capa se manifiesta con una potencia máxima aproximada de 20 m entre los sitios 7 a 9 y por debajo del sitio 5, mostrando su mínima potencia hacia el sitio 6 con el mismo comportamiento que su unidad suprayacente, estas primeras dos unidades se aprecian a menor profundidad en la región cercana al sitio 6 del perfil. Por otra parte, la tercera unidad U3 se encuentra por debajo de la unidad U2 con una resistividad menor a los 10 Ohm m. Para la subunidad U3A se aprecia su máxima potencia debajo del sitio 6, de aproximadamente 50 m, y su mínimo espesor se aproxima a los 30 m en el resto del perfil. Mientras que para la subunidad U3B, se aprecia un comportamiento conductor con una resistividad inferior a los 5 Ohm m, dicha capa se puede encontrar a una menor profundidad debajo del sitio 5, el espesor no se puede saber dadas las premisas con las que se tomaron los datos.

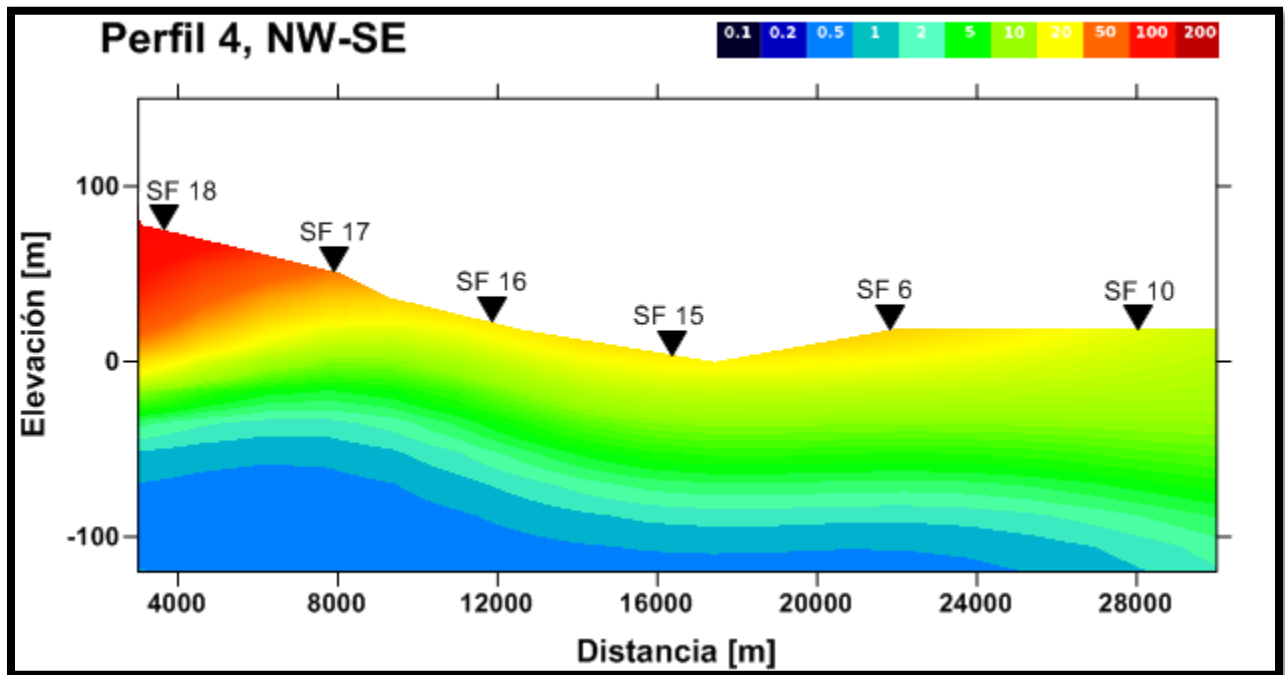


Figura 5.7. Perfil geoelectrico 4. Valle de San Felipe, Baja California

El perfil número cuatro está conformado por seis sondeos transitorios electromagnéticos a lo largo de aproximadamente 25 km. La orientación de dicho perfil es NW-SE manteniendo una relación semi-perpendicular a los primeros tres perfiles antes descritos. El perfil en su zona este se encuentra a poca distancia de Punta Estrella dentro del Valle, atravesando además, los perfiles 2 y 3 en sus extremos noreste. Se aprecia en la parte más somera a la unidad U1, que tiene su máxima potencia debajo del sitio 18, aproximadamente 80 m, a partir del cual comienza a disminuir su espesor lateralmente hasta el sitio 16, dicha capa presenta una resistividad mayor a los 50 Ohm m. La unidad U2 se aprecia en prácticamente todo el perfil, encontrando su máxima potencia aproximada de 30 metros en la región del sitio 6, y su mínimo espesor se encuentra hacia la zona poniente del perfil, aproximadamente de 20 m. La resistividad que presenta la unidad esta entre los 10 y 50 Ohm-m. Para la unidad U3, en primera instancia se aprecia la subunidad U3A con resistividad entre los 5 y 10 Ohm-m, donde la máxima potencia que alcanza la unidad es de 40 m en la región oriental del perfil, así mismo, su mínimo espesor se aprecia en el extremo contrario debajo del sitio 18, aproximado de 30 m. Mientras que para el resto de la unidad U3, se aprecia un comportamiento irregular, es decir, respecto al nivel de profundidad al que se encuentra, tiene mayor profundidad entre los sitios 15-16, y los sitios 6-10.

La unidad presenta un comportamiento conductivo y no se puede definir con certeza el espesor dadas las condiciones de adquisición de los datos. El comportamiento visto en los cuatro perfiles es congruente y similar, pues la resistividad que se aprecia en los perfiles es descendente en relación del aumento de la profundidad en el Valle de San Felipe, Baja California.

Como ya se mencionó las unidades geoelectricas descritas en los perfiles anteriores, se aprecia que la sedimentación del valle de San Felipe, Baja California se ha visto poco afectada geológicamente y se observan las unidades geoelectricas semi-horizontales. Aunado a las limitaciones de los datos, se ven un ligero comportamiento de pliegue hacia la sierra que limita el valle al poniente. Se sabe que existen 58 sitios de aprovechamiento de aguas subterráneas en la región, de los cuales sólo 19 siguen activos. Estas fuentes de extracción son explotadas de unidades someras, es decir, la unidad con potencial intermedio aquí propuesta.

Para el área de estudio se realizaron un par de trabajos con el fin de dar información importante de la región, para conocer las características del acuífero. Por lo que se realizaron dos trabajos por parte de CONAGUA (1984 y 1989), el primero de ellos consto en realizar secciones con información de pozos, que explicaran la distribución de regiones de interés, entre otros objetivos del trabajo se buscó conocer cómo era la recarga del mismo acuífero. Esta campaña se realizó en 1984, que entre sus aportaciones había dos secciones relacionadas con pozos y de dicho trabajo se tomó el perfil más largo que atravesada el valle, el cual tenía una ubicación similar a algunos de los sondeos mostrados en este trabajo, lo que permitiría realizar una comparación. Por otra parte, el segundo trabajo realizado en dos campañas en 1989 y 1990, consto de realizar un estudio geoelectrico en la región de Agua Salada y San Felipe, Baja California. Se utilizó un método eléctrico, conocido como sondeo eléctrico vertical, del trabajo sólo se tomó la información referente al Valle en cuestión, para el método se utilizó un arreglo Schlumberger con una apertura AB/2 máxima de 1000 m, separados entre 0.5 y 1.5 km. Concentrándose el trabajo en el centro del Valle, de dicho estudio se obtuvieron ocho secciones hidrogeológicas, de las cuales se hace referencia a dos de ellas.

Para considerar el trabajo previo en la zona se realizaron tres perfiles más, los cuales atraviesan los perfiles antes descritos, además los perfiles 5, 6 y 7 cruzan por el centro el valle de San Felipe, Baja California, y pasan por la mitad del perfil 2 y 3. Para obtener una mejor visualización de los perfiles ver la figura 5.8. Los datos obtenidos del nivel estático en la zona en 1989 van entre 5 y 85 metros (figura 5.9), con un aumento para 2007 entre 1 y 20 metros, de oeste a este respectivamente.

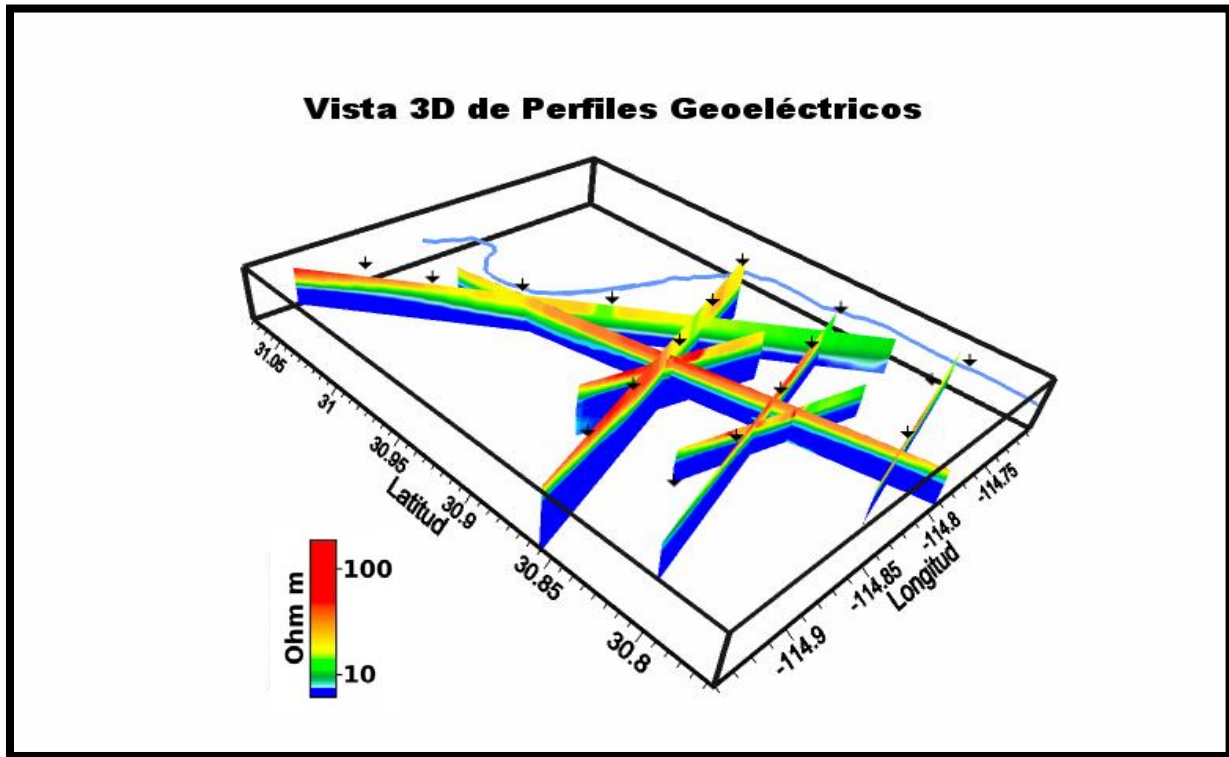


Figura 5.8. Perfiles geoelectricos en el Valle de San Felipe, Baja California.

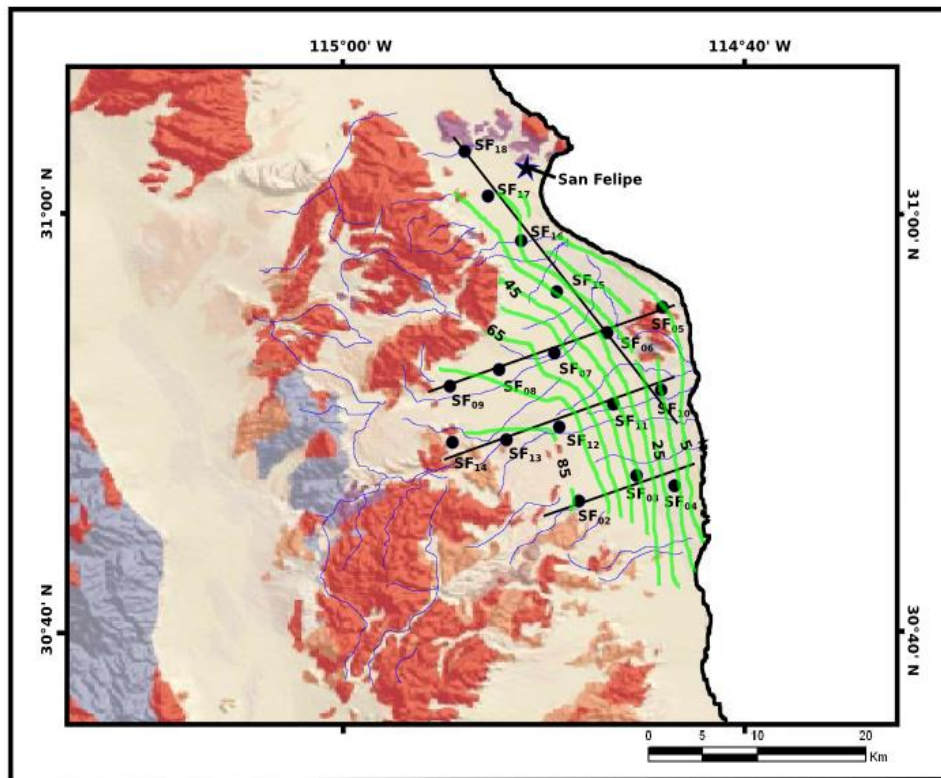


Figura 5.9. Nivel estático Valle de San Felipe, Baja California (SGM, 2015, CONAGUA, 1989).

Resumiendo lo observado en los perfiles, se muestra la siguiente, que representa de manera sucinta las unidades geoelectricas presentes en el Valle de San Felipe, Baja California.

**Tabla 5.1. Unidades geoelectricas inferidas en los sondeos transitorios electromagnéticos.**

Unidad Geoelectrica	Rango de Resistividad [ohm m]	Descripción
U1	>50	Unidad geoelectrica superficial de resistividad alta
U2	10-50	Unidad geoelectrica de resistividad media
U3A	<10	Unidad geoelectrica de resistividad baja entre 5 y 10 Ohm m
U3B		Unidad geoelectrica de resistividad baja, menor a los 5 Ohm m

Por otra parte, con fines de equiparar con el trabajo previo en la zona, se realizaron siete perfiles de la zona de estudio en su parte central, y de manera general se observa el mismo comportamiento de las unidades obtenidas y la disposición de las capas. Debido que el motivo general original de los datos de transitorio electromagnético fue para realizar la corrección estática de sondeos magnetotelúricos realizados en la zona con fines de exploración geotérmica, resulta posible confirmar que la comparación es satisfactoria a pesar de las condiciones de adquisición que no tenían como prioridad obtener una resolución lateral tan detallada en la región.

## 6. Discusión de Resultados

Realizando un análisis para la comparación de la información resultante, se consideran dada su distribución espacial sólo tres de los once perfiles existentes para la zona del Valle de San Felipe, Baja California, obtenidos con el método eléctrico de sondeo eléctrico vertical (CONAGUA, 1989) y que además dos se encuentran confirmados con información de pozos (SARH, 1984a-1984b). Los perfiles en cuestión (figura 6.1) son: AA', EE' y GG' los cuales se eligieron por tener una posición y orientación comparable con la ubicación de los sondeos procesados en el presente trabajo.

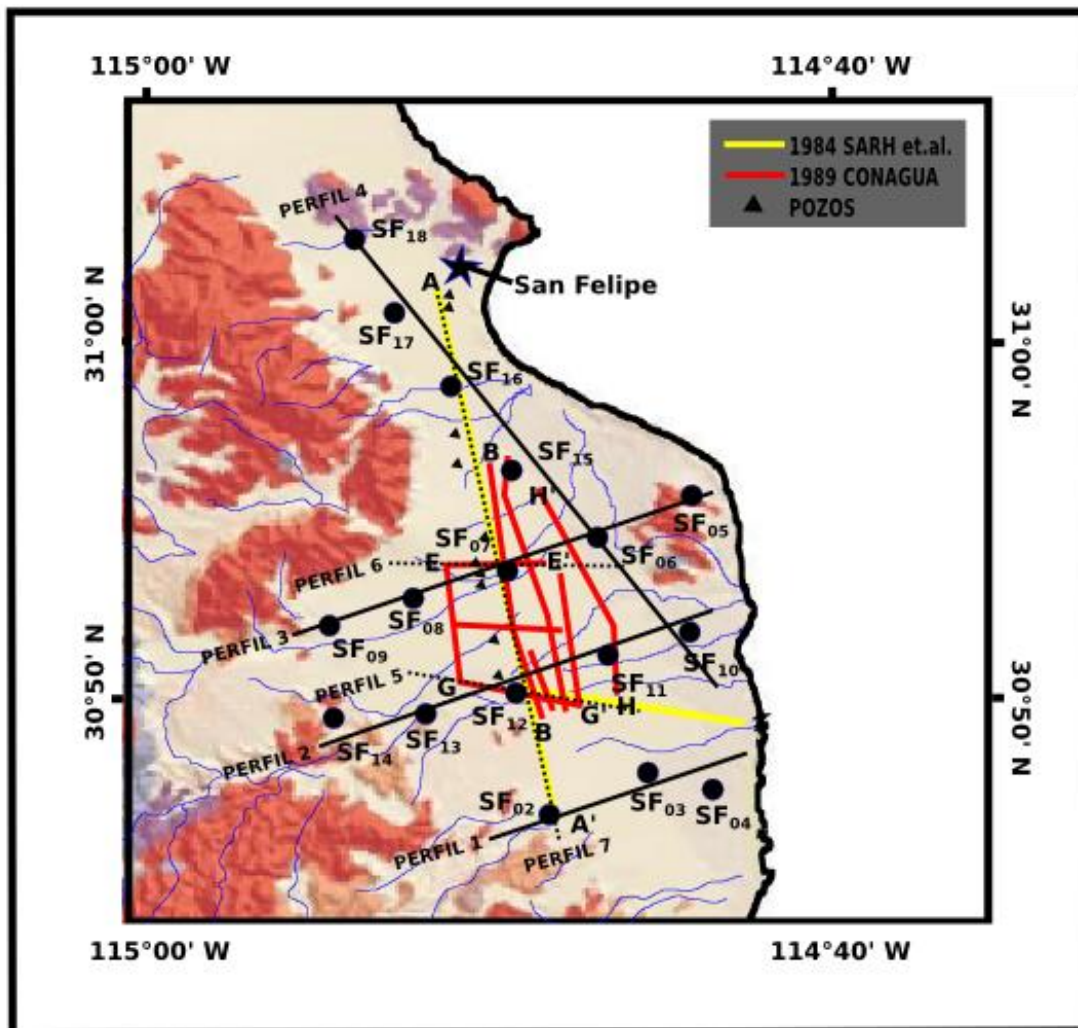


Figura 6.1. Ubicación de perfiles propuestos, perfiles de SARH (1984a) y perfiles de CONAGUA (1989).

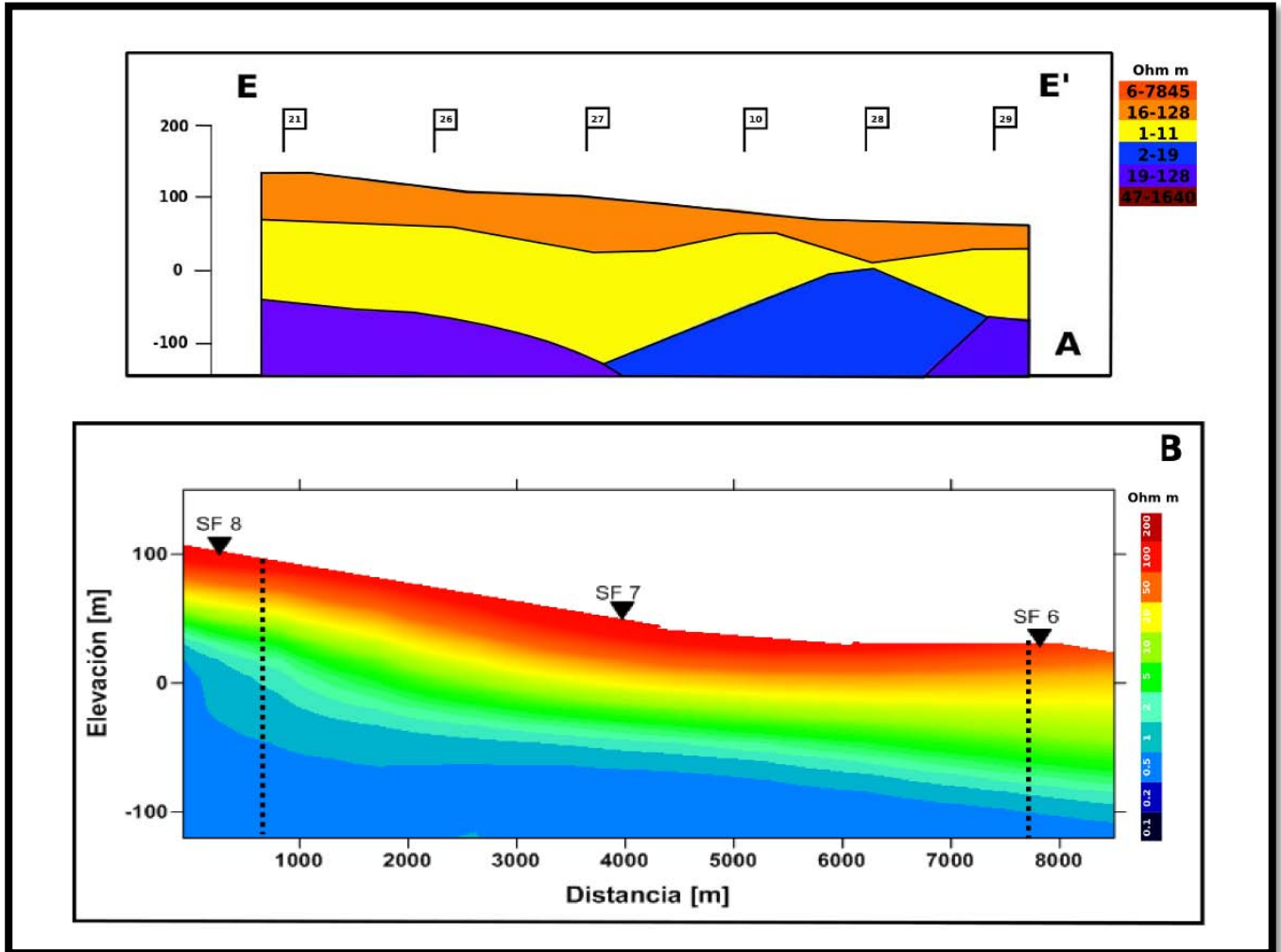
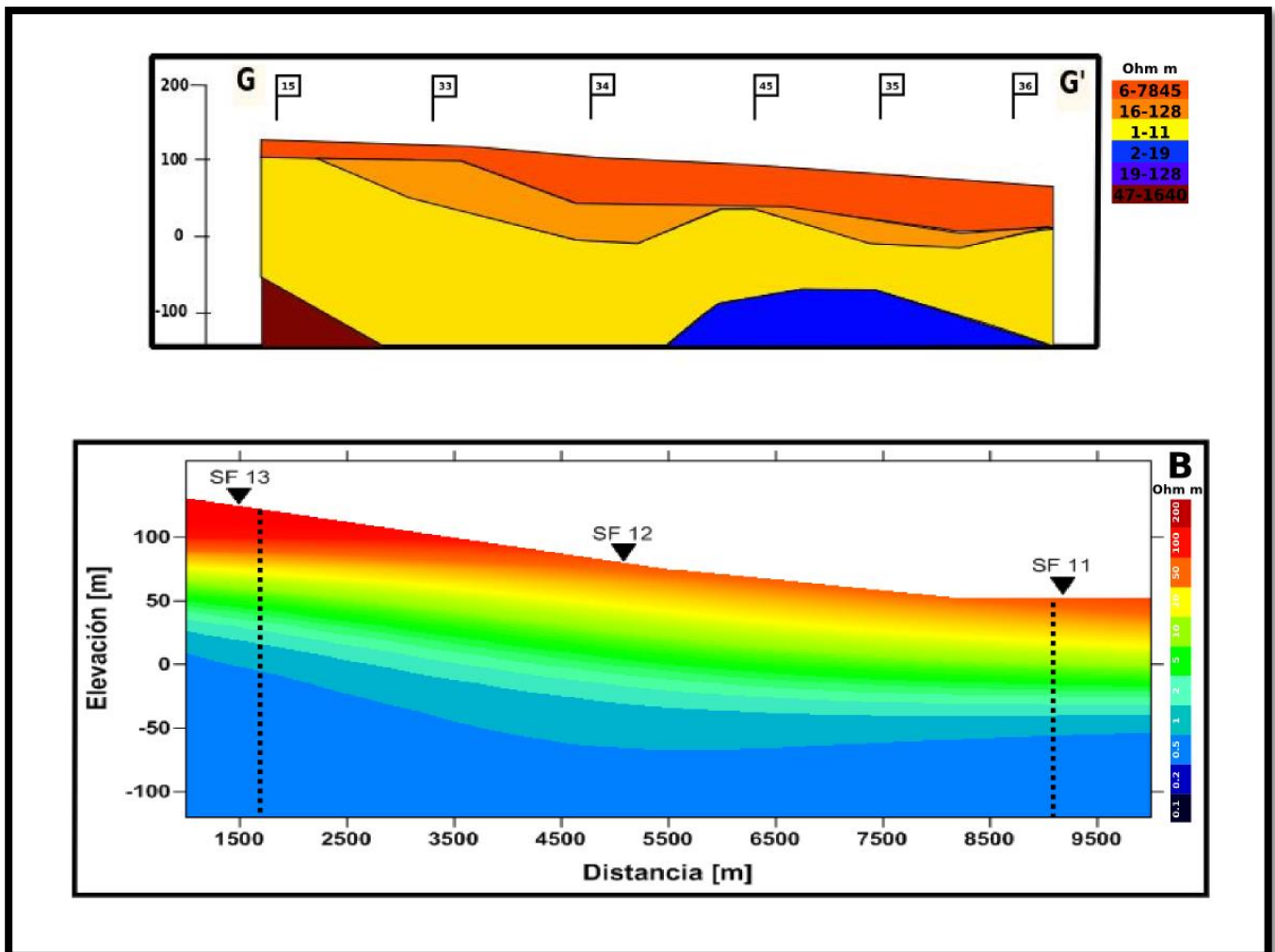


Figura 6.2. A) Perfil hidrogeológico EE' de CONAGUA (1989) y B) perfil geoelectrico 5.

Se generó el perfil 5 con la misma dirección de EE' para su comparación, el perfil está comprendido por los sitios 6, 7 y 8. Se puede apreciar la misma disposición de unidades, presenta el mismo orden en cuanto a resistividad, además se puede observar el mismo comportamiento en la sección entre el sitio 7 y 8. Por otra parte, los valores de resistividad se encuentran en un rango de magnitud comparable, ver figura 6.2.



**Figura 6.3. A) Perfil hidrogeológico GG' de CONAGUA (1989) y B) Perfil 6.**

En el perfil GG' se comparó con el perfil generado 6, conformado por los sitios 11, 12 y 13, se observa la misma disposición de unidades, presentan el mismo efecto de resistividad ascendente conforme aumenta la profundidad y al ver que comparten la misma dirección los perfiles EE' y GG' se pueden observar resultados similares en la disposición de unidades geoelectricas. Se aprecia que, para los perfiles presentados por CONAGUA existe una capa que se acuña hacia los extremos y su máxima potencia se visualiza en la región central, dicha capa no se observa en los perfiles 6 y 7. A pesar de ello presentan la misma tendencia general de las unidades, figura 6.3.

Por otra parte el perfil AA' de CONAGUA (1984a), está dispuesto en la misma distribución de algunos sitios, el perfil tiene información de pozo, de los cuales se tiene el registro y se logra realizar un perfil correlacionado con esta información, por lo cual se tomó dicho perfil para realizar la comparación con el perfil 7 generado con los sitios: 2, 12, 7, 15, 16 y 17.



Se realizaron las comparaciones pertinentes (información de pozos y resultados previos) y a grandes rasgos se puede ver el mismo comportamiento, destacando que el nivel estático delimitado en 1984 y tomando en cuenta la elevación desde aquel año puede asociarse a la capa con resistividades entre 8 y 16 Ohm m. Con ayuda de registros se ve una disposición parecida al perfil 7. Para la parte norte (izquierda del perfil 7) podemos ver una elevación, que pudo ser generada por la interpolación de los datos para esa zona, pues el sitio 17 se encontraba a una distancia aproximada a un kilómetro. Con la información de los pozos vemos una disposición granulométrica que de manera general disminuye su tamaño hacia la superficie, aunque se presentan pequeñas intercalaciones de gravas con arenas finas a lo largo de los pozos.

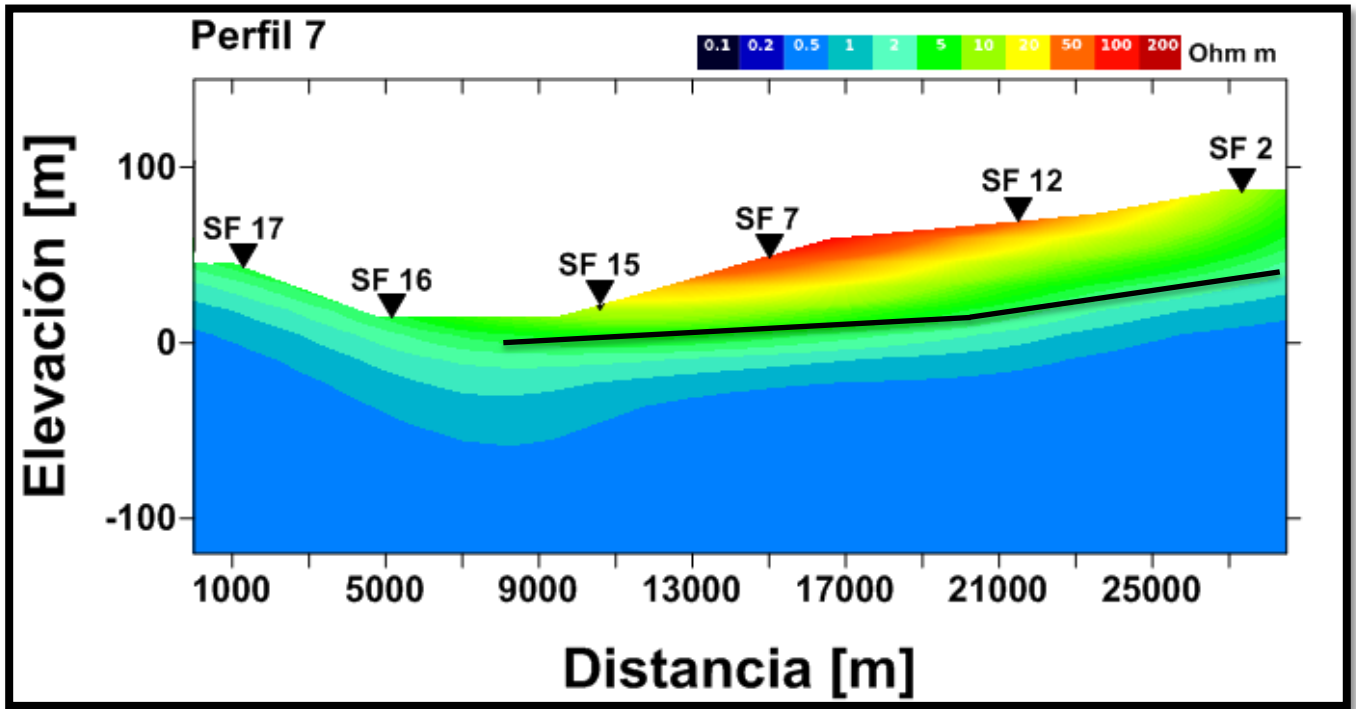


Figura 6.4. Perfil geoelectrico 7.

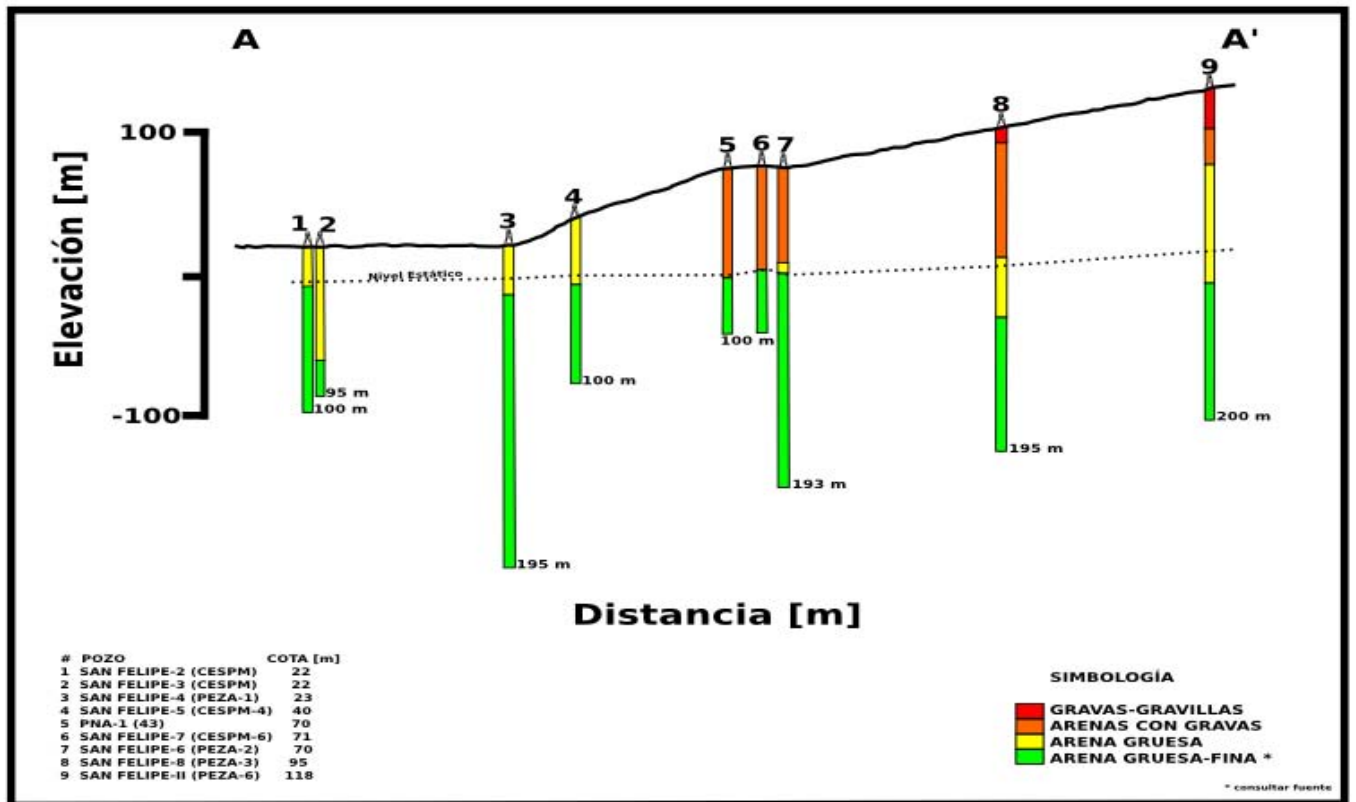


Figura 6.5. Perfil AA' simplificado (CONAGUA, 1984).

De manera general, los resultados obtenidos por CONAGUA (1989) y los resultados obtenidos con los sitios interpretados de los sondeos transitorios electromagnético se presenta la siguiente tabla 6.1.

**Tabla 6.1. Comparación de resultados con el trabajo previo de 1989.**

CONAGUA (1989)			Sondeos Transitorios Electromagnéticos		
Unidad	Litología Asociada	Resistividad	Resistividad	Litología Asociada	Unidad
I	Basamento granítico y/o rocas volcánicas postbatolíticas asociadas	47-1640	---	---	---
II	Antiguos depósitos granulares compactos, intercalados con depósitos ígneos extrusivos.	19-110	---	---	---
III	Materiales granulares poco compactos en los que predomina la arcilla t probablemente agua de muy alta salinidad	2-19	< 5	Material compacto de granulometría fina.	3B
IIIa	Depósitos granulares finos probablemente de tipo lacustre, saturados con agua muy salina o bien agua marina congénita. Cabe la posibilidad de que también el agua sea termal	1-11	5-10	Material poco consolidado de menor tamaño.	3A
IV	Materiales granulares poco compactos, con mucho menor contenido de arcillas que la unidad III y que contiene agua de regular calidad	22-128	10-50	Material poco consolidado	2
V	Materiales muy poco compactos, de granulometría muy variada, representan la parte superior del embalse subterráneo, normalmente no están saturados, pero en alguno sitios su base ya contiene agua	6-7845	> 50	Material superficial de diversa granulometría	1

Una vez obtenidos los resultados se analizaron y relacionaron los datos previos de geología y geofísica, así como los trabajos previos hechos en la zona permitiendo establecer las unidades hidrogeológicas presentes en el subsuelo del Valle San Felipe con el método de sondeos electromagnéticos transitorios. A continuación se describen las unidades del área de estudio, tabla 6.2.

### **Unidad Hidrogeológica 1**

La unidad hidrogeológica UH1 se define por presentar resistividad alta, superior a los 40 Ohm m referente a la unidad U1, que puede asociarse a la presencia de material de diversa granulometría y de diferente composición como rocas ígneas. Dicha unidad se comporta como una zona no saturada que permite la infiltración del agua hacia capas inferiores, lo cual ayuda en gran medida a la recarga del acuífero del Valle San Felipe, Baja California.

### **Unidad Hidrogeológica 2**

La unidad hidrogeológica UH2 se relaciona con la unidad U2 presentando una resistividad de media a baja, que pudiese asociarse a material arenoso, como pueden ser los depósitos eólicos o lacustres, con resistividades entre 10 y 40 Ohm m, por lo que presenta la cualidad de ser un potencial intermedio para la extracción de agua subterránea, el espesor de la unidad varía entre 15 y 60 metros debajo de la unidad U1, con mayor su mayor espesor en la zona noreste del Valle.

### **Unidad Hidrogeológica 3**

La unidad hidrogeológica UH3 correspondiente a la unidad U3A presenta resistividades menores a 10 Ohm m, por lo que el material puede asociarse a material arenoso de menor granulometría que la UH2, la resistividad de la unidad nos sugiere un alto potencial para la extracción de agua.

### **Unidad Hidrogeológica 4**

La unidad hidrogeológica UH4 se relaciona a la unidad U3B, la unidad presenta una resistividad menor a 5 Ohm m, asociándose a un material fino y que por ello, tiene la posibilidad de encontrarse saturado. Indicándonos que la unidad tiene un potencial bajo.

**Tabla 6.2. Conjunción de las unidades geoelectricas con las unidades hidrogeológicas.**

<b>Unidad Hidrogeológica</b>	<b>Unidad Geoelectrica</b>	<b>Comportamiento hidrogeológico</b>
UH1	U1	Zona libre, no saturada
UH2	U2	Zona con potencial intermedio
UH3	U3A	Zona con alto potencial
UH4	U3B	Zona con bajo potencial

Dadas las condiciones presentes en la zona de interés, la unidad UH2 es la que permite el abastecimiento de agua subterránea en la región, mientras que la UH1 permite la infiltración a las unidades subsecuentes. La tercera unidad UH3 es la que tiene un mayor potencial debido al nivel de saturación que presenta y el tipo de material al que se asocia, un potencial mayor que la segunda unidad UH2. Por otra parte, la cuarta unidad se encuentra con mayor una posibilidad de estar saturada dado el material al que se asocia, conllevando que sea complicado realizar la extracción de agua debido a la baja movilidad del líquido en la unidad, por ello no se contemplaría para extracción. El nivel estático del acuífero varía entre los 5 y 85 metros, por lo que a diferencia de otros sitios, su extracción y consecuente uso sería más factible por encontrarse la poca profundidad.

En base a los resultados obtenidos y a las correlaciones realizadas en la integración de la información geológica e hidrológica de la zona, nos sugiere que las unidades importantes son la UH2 y UH3. En especial la segunda resulta una zona para exploración. Por otra parte se sabe que el acuífero está subexplotado y se limita conforme se acerca a la zona costera al noreste del valle, donde presenta un equilibrio con el mar que lo define como un acuífero libre.

Por otra parte, la región que presenta mejores características geoeléctricas y geológicas para posible extracción es la zona sur-central correspondiente espacialmente a una sección cercana al Río Huatamote hasta la región del Arroyo Percebú. Siendo más específico en los alrededores del sitio 12.

A pesar de las condiciones iniciales definidas en la adquisición de datos, presentan buenos resultados, inclusive con los resultados de otra prospección (métodos eléctricos), por lo que es recomendable y se sugiere realizar una campaña con ésta técnica, en la cual se maneje un mejor detalle de adquisición y que tenga como objetivo obtener modelos de mejor calidad del valle, utilizando un aumento en la bobina, incrementando sus dimensiones para garantizar una mayor profundidad. Lo anterior ayudará a tener mayor información de las características del Valle de San Felipe, Baja California, en la disposición de agua subterránea y con ello poder brindar una mejor gestión para escenario a futuro.

## 7. Conclusiones

En general para la exploración geofísica se debe tener consideraciones previas para establecer un plan de trabajo, ya que no todos los métodos en primera instancia son convenientes para cualquier sitio, por ello, un trabajo previo de carácter geológico ayuda a delimitar el tipo de prospección a realizar y aún más importante es tener bien definido el objetivo o el interés hacia el cual llevaran los resultados. Es importante determinar todos los parámetros que afecten tanto al método como a los mismos resultados, para no incurrir en errores sistemáticos propios de software, algoritmos y propios de adquisición.

Para las actividades realizadas con el método transitorio electromagnético, se aprecian resultados suficientes para caracterizar a grandes rasgos el valle de San Felipe, Baja California, pues permiten dar cierto grado de detalle de los horizontes de las unidades geoelectricas presentes en el área y obtener una buena estimación de la profundidad del nivel estático del acuífero San Felipe-Punta Estrella. Debido a las condiciones de la geología y morfología del lugar se estimó una profundidad de investigación esperada superior a los 200 m, ya que se utilizó una intensidad de corriente de 9A, y a pesar de dicha consideración en el método no se logró obtener un resultado que mostrase el basamento del acuífero, limitando el análisis en cuestión.

Con los 17 sondeos transitorios electromagnéticos se elaboraron cuatro secciones del valle, tres con una dirección preferencial noreste-suroeste y uno semi-perpendicular a los tres anteriores. Se obtuvieron además, tres secciones de apoyo para cerciorar la información de los primeros cuatro perfiles y permitir comparar los resultados con la información existente de la región. Para dichas secciones se lograron observar tres unidades geoelectricas; U1, U2 y U3, donde la última se subdividió en dos más, U3A y U3B. En general, se logra apreciar una disposición de capas semi-horizontal, debido a la poca alteración de los sedimentos que conforman el relleno del Valle. Por otra parte, presenta una gradación ascendente de la resistividad en función de la profundidad.

Para la unidad U1, se observa que presenta una resistividad superior a los 40 Ohm m, se logra asociar a elementos geológicos compuestos de rocas ígneas, así como arenas gruesas, como lo pueden ser los depósitos aluviales en el Valle, presenta un espesor promedio de 40 m para dicha unidad.

Para la unidad U2, se observa una resistividad comprendida entre 10 y 40 Ohm m, que puede asociarse a depósitos de arena de gruesa a media y compacta, además se puede asociar con la sedimentación eólica y lacustre presente en el Valle, el espesor es más variado que la unidad anterior, pero en promedio presenta 60 m.

Para la unidad U3 presente con una resistividad menor a los 10 Ohm metros, se subdivide en dos unidades, donde la primera U3A comprende un rango 5-10 Ohm m y se atribuye a material areno-arcilloso con saturación media. Mientras que para la unidad U3B, con valores menores a los 5 Ohm m, presenta una mayor saturación, la unidad en conjunto se comporta como una unidad resistiva y posiblemente influyo de manera sustancial en no obtener la profundidad de investigación deseada.

Debido a los datos resultantes asociados con la geología y la hidrogeología, fue posible correlacionar los modelos geoeléctricos para poder presentar un modelo de unidades hidrogeológicas que caractericen la zona de estudio, permitiendo conocer de manera general zonas que sirvan para su posible explotación y además saber cuáles unidades son las que permiten la recarga del acuífero. Dichas zonas de interés pertenecen a la unidad U3, y debido a la topografía del lugar, se sugiere que sea en la parte suroeste del valle para garantizar que la recarga por pendiente se siga suscitando en el lugar.

Los sondeos electromagnéticos permiten evidenciar los horizontes de unidades geoeléctricas, teniendo dificultad dada la teoría en capas con alta resistividad. Por lo que la interpretación conjunta de la información es fundamental para reducir la incertidumbre que tiene por naturaleza el método.

Finalmente, se recomienda el uso de la técnica para caracterizar acuíferos, ya que brinda información suficiente si se toman las consideraciones pertinentes para cada área de estudio. Para el presente caso, se recomienda utilizar sondeos transitorios electromagnéticos con bobinas más grandes para poder lograr ver el basamento del acuífero y aumentar el detalle del modelo resultante, que complemente de mejor manera la información concerniente y que permita mejorar la gestión del recurso.

## **Bibliografía**

**Anderson L., W.**, 1979, Computer Program Numerical Integration of related Hankell transforms of orders 0 and 1 by adaptative digital filtering. *Geophysics*. 44 (7), 1287-1305.

**Anderson V., P.**, 1993, Prebatholithic stratigraphy of the San Felipe area, Baja California Norte, Mexico, Geological Society of America, Spec. Pap., 279, 1-10.

**Böhnel, H., Delgado-Argote, L.**, 2000, Paleomagnetic data from northern Baja California (Mexico): Results from the Cretaceous San Telmo batholith, in *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*, Geological Society of America, Spec. Pap., 334, 157–165.

**Böhnel, H., Delgado-Argote, L., Kimbough, D.**, 2002, Discordant paleomagnetic data for middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: Latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation?, *Tectonics*, 21(5), 1-12.

**Carabias, J., Landa, R.**, 2005, Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México, primera edición, México, D.F. , Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte.

**CONAGUA**, 2008, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 0222 San Felipe- Punta Estrella Estado de Baja California, Subdirección de Aguas Subterráneas; Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.

**CONAGUA**, 2015, Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero 0222 San Felipe- Punta Estrella Estado de Baja California, Subdirección de Aguas Subterráneas; Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.

**CONAGUA**, 2013, Estrategias de Gran Visión para el Abastecimiento del Agua en las Ciudades y Cuencas de la Frontera Norte.

**CONAGUA**, 2013, Atlas del agua en México 2013.

**CONAGUA**, 2014, Estadísticas del agua en México.

**CONAGUA, SEMARNAT**, 2015, Cuidemos y Valoremos el agua que mueve a México, 22 de marzo, día mundial del agua.

**CONAGUA (SARH)**, 1989, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Estudio Geohidrológico Preliminar en las Zonas Laguna Salada y San Felipe, Baja California, Estudios y Construcciones ALAS, S.A.

**CONAGUA (SARH)**, 1984a, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Estudio Geohidrológico en las Zonas Laguna Salada y San Felipe, Baja California, Estudios y Construcciones ALAS, S.A.



**CONAGUA (SARH)**, 1984b, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dictamen Geohidrológico del Valle de San Felipe-Punta Estrella, Municipio de Mexicali, B.C.

**Constable, C., S, Parker, L., R., Constable, G., C.**, 1987, Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*. 52(3), 289-300.

**Corral, G., R.**, 2000, Informe de la carta geológica-minera y geoquímica Lazaro Cardenas, Clave H11-5-6, Escala 1:250000, Estado de Baja California.

**Consejo de Recursos Minerales**, CRM, 2000, Informe de la carta Geológico-Minera y Geoquímica Lazaro Cardenas, H11-5-6, Esc. 1:250,000, Baja California.

**Fitterman, D.V., Anderson, W., L.**, 1987, Effect of transmitter turn-off time on transient soundings. *Geoexploration*, 24, 131-146.

**Flores, L., C.**, 2000, La exactitud del problema directo de sondeos electromagnéticos transitorios, Departamento de Geofísica Aplicada. División de Ciencias de la Tierra. CICESE, GEOS, 20(2), 70-88.

**George, V., K.**, 1997, StrataSearch, Golden, Colorado, Principles of time-domain electromagnetic (TDEM) sounding, 16(4), 355-357.

**Gobierno de BC**, 2008, Programa Estatal del Agua de Baja California 2008-2013.

**Grant, F.S. and West, G.F.**, Interpretation theory in applied geophysics, Mcgraw-Hill, 1965.

**INEGI**, 2015a, Carta Geológica-Minera: 4\_H11-3\_GM y 5\_H11-5-6\_GM, <http://www.inegi.org.mx>

**INEGI**, 2015b, Carta Hidrológica: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccat/hidrologia/>

**INEGI**, 2015c, Carta Fisiográfica: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccat/fisiografia/>

**Lonsdale, P.**, 1989, Geology and tectonic history of the Gulf of California, *The Geology of North America*, The Geological Society of America, N, 499-521.

**Lewis, J., C.**, 1996, Stratigraphy and geochronology of Miocene and Pliocene volcanic rocks in the Sierra San Fermín and southern Sierra San Felipe, Baja California, México, *Geofísica Internacional*, 35(1), 3-25.

**Macnae, J., C., Lamontagne, P., West, G., F.**, 1984, Noise processing techniques for time-domain EM systems, *Geophysics*, 49 (7), 934-948.

**Mc Neill, J. D.**, 1994, Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding, Technical Note TN-27, Geonics Limited.

**Mc Neill, J. D.**, 1980, Electrical Conductivity of Soils and Rocks; Technical Notes TN-5; Geonics Limited.

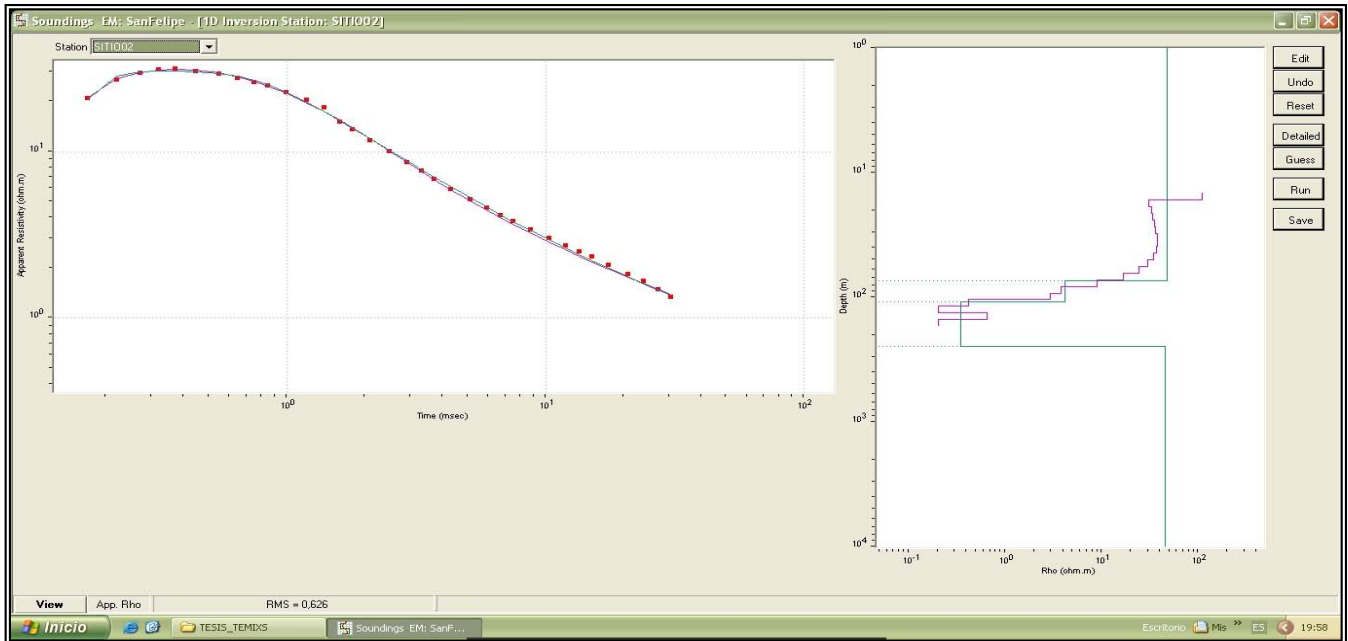
**Mc Neill, J. D.**, 1980, Applications of Transient Electromagnetic Techniques; Technical Notes TN-7; Geonics Limited.

**Morán, Z., Dante, J., et al.**, 2015, Geología de la República Mexicana, INEGI.

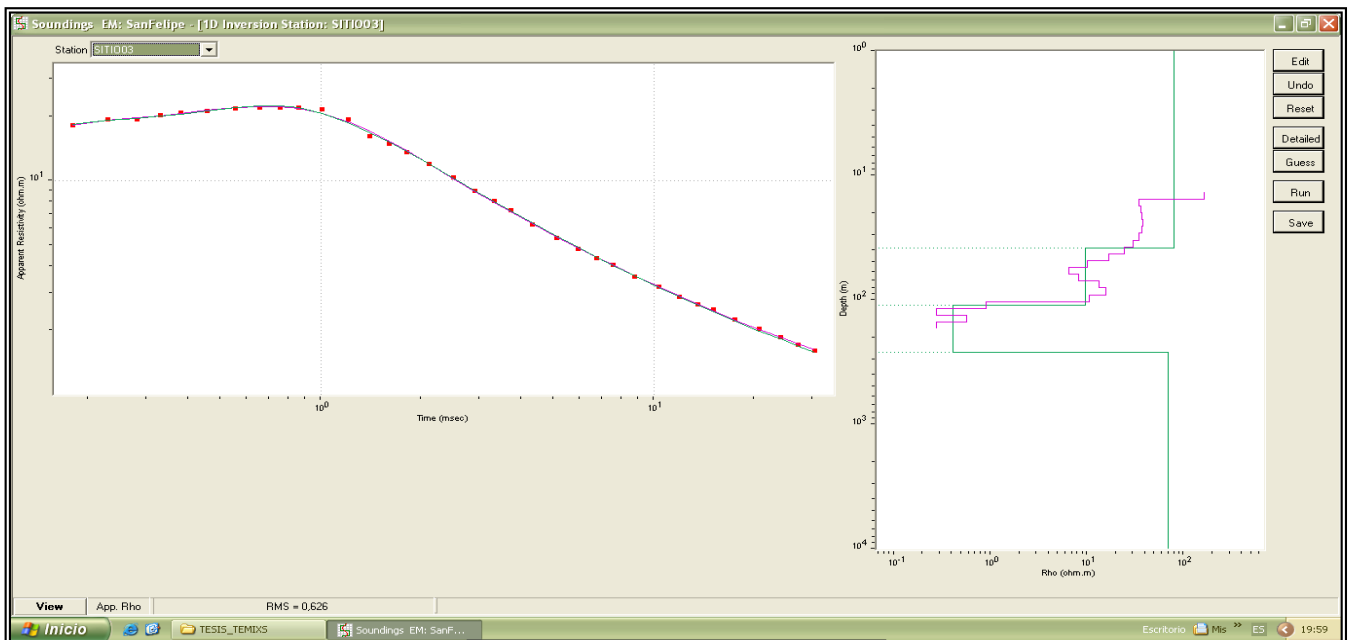
- Nabighian, M., N.**, 1979, Quasi-static transient response of a conducting half-space; An approximate representation, *Geophysics*, 44, 1700-1705.
- Nabighian, M., N., Macnae, J., C.**, 1991, Time domain electromagnetic prospecting methods. In: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods Applied to Geophysics Part A*, 2(6), 427-520.
- Oskin, M.**, 2003, Pacific–North America plate motion and opening of the Upper Delfiín basin, northern Gulf of California, Mexico, *Geological Society of America*. 115(10), 1173-1190.
- Ryu, J., Morrison, H., F., Ward, S., H.**, 1970, Electromagnetic effects about a loop source of current. *Geophysics*. 35, 862-896.
- Sliker Jr., G.,R.**, 1970, Geologic and geophysical reconnaissance of the Valle de San Felipe region, Baja California, México. Tesis de Maestría, Faculty of San Diego State College, 8-37.
- Spies, B., R.**, 1989, Depth of investigation in electromagnetic sounding methods, *Geophysics*, 54 (7), 872-888.
- Stanley, H., W., Gerald, W., H.**, 1988. *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications*, In ods. In: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*,1, 130-311.
- Telford, W., M., Geldart, L., P., Sheriff, R., E.**, 1988, *Applied Geophysics; Electromagnetic theory for geophysical applications*. 60-134.
- TEMIXS**, Temixs V. 3.0, User’s Manual, Transient Electromagnetic Data Interpretation Software, Interpex Limited, Golden Co., 1983.
- TERRATEM**, Operator’s Manual. Types M, MM and MMS, V61.4.9. Mineral Control Instruments Limited (ACN 007 954 627) Australia, 1993
- K. Vozoff** , 1991, The Magnetotelluric Method. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*: pp. 641-712.
- Wait, J.R.**, 1962, Theory of magneto-telluric fields, *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Radio Propagation*, v. 66D, p. 509-541.
- Walker, R., T., Thompson, W., R.**, 1968, Late Quaternary Geology of the San Felipe Area, Baja California, Mexico, *The Journal of Geology*, 76(4), 479-485.
- WinGLink** (TM), Versión 1.62.04-20030325, 2008, GEOSYSTEM SRL, WinGLink® User's Guide.
- Stock, M., J., Lewis, J., C., Nagy, E.**, 1999, The Tuff of San Felipe: an extensive middle Miocene pyroclastic flow deposit in Baja California, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 93 (1-2), 53–74

## ANEXOS

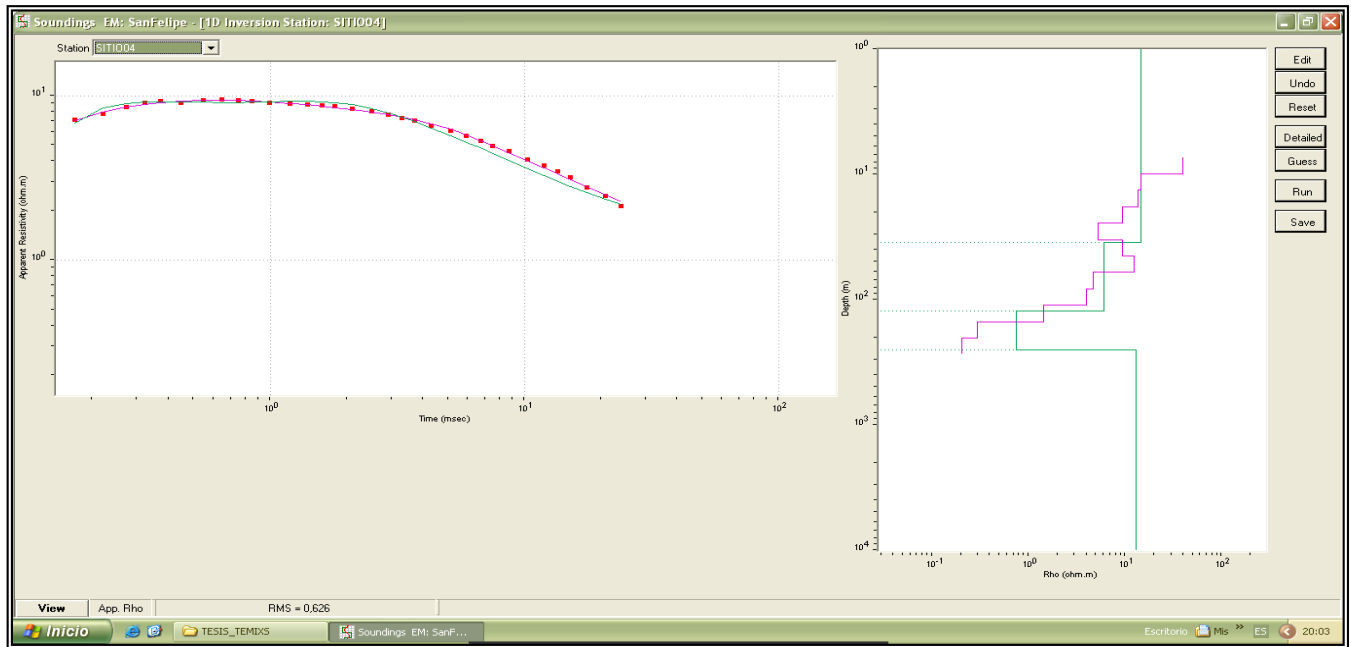
Las siguientes figuras son los resultados obtenidos para cada sitio con el programa Winglink, con su curva de resistividad aparente, y el modelo suavizado obtenido a partir de la inversión de Occam.



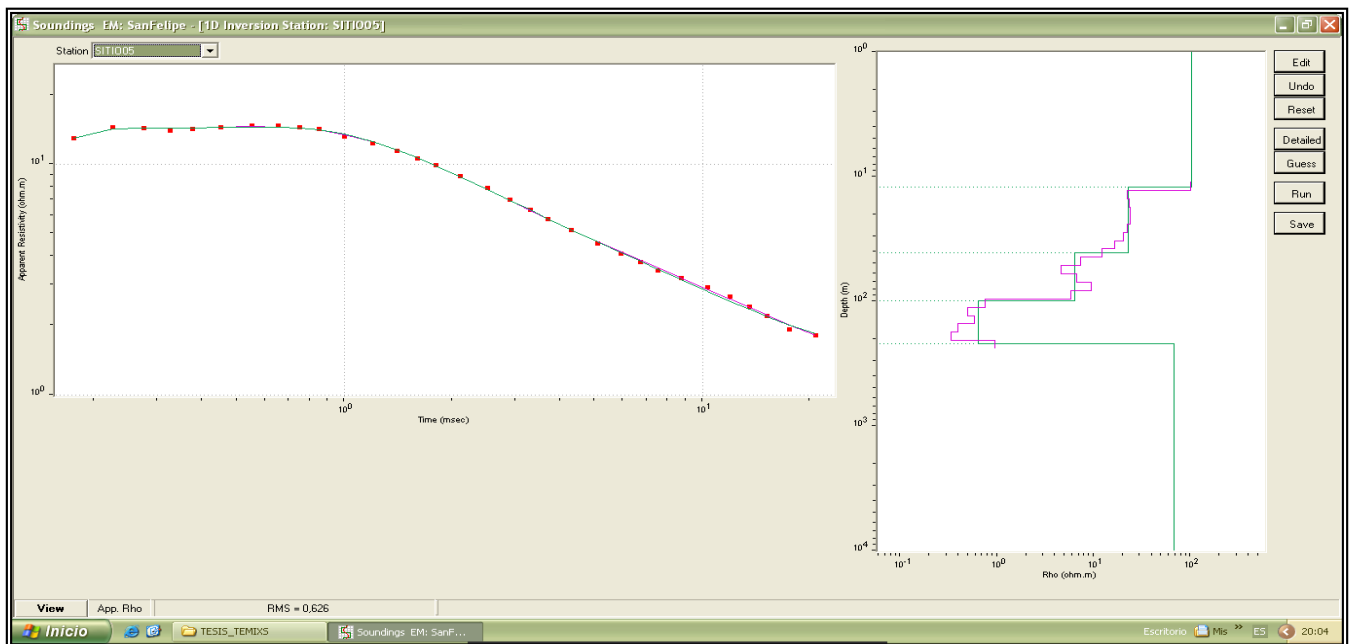
**Anexo 01. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 02.**



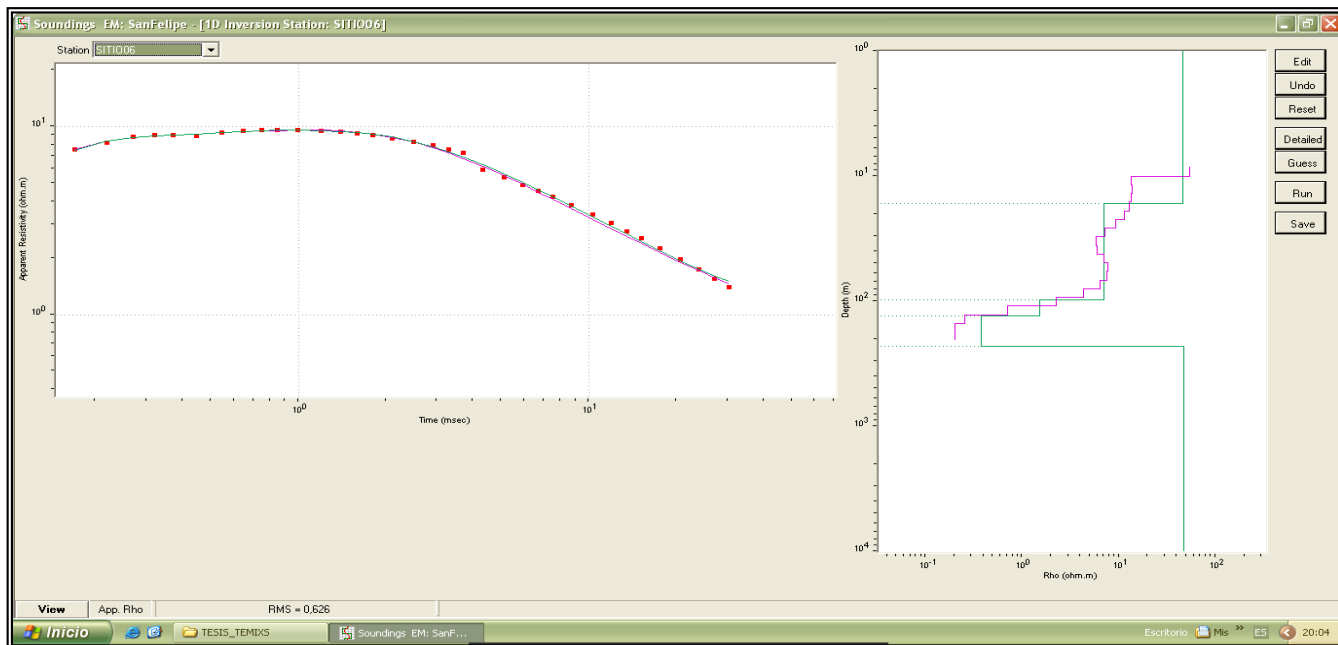
**Anexo 02. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 03.**



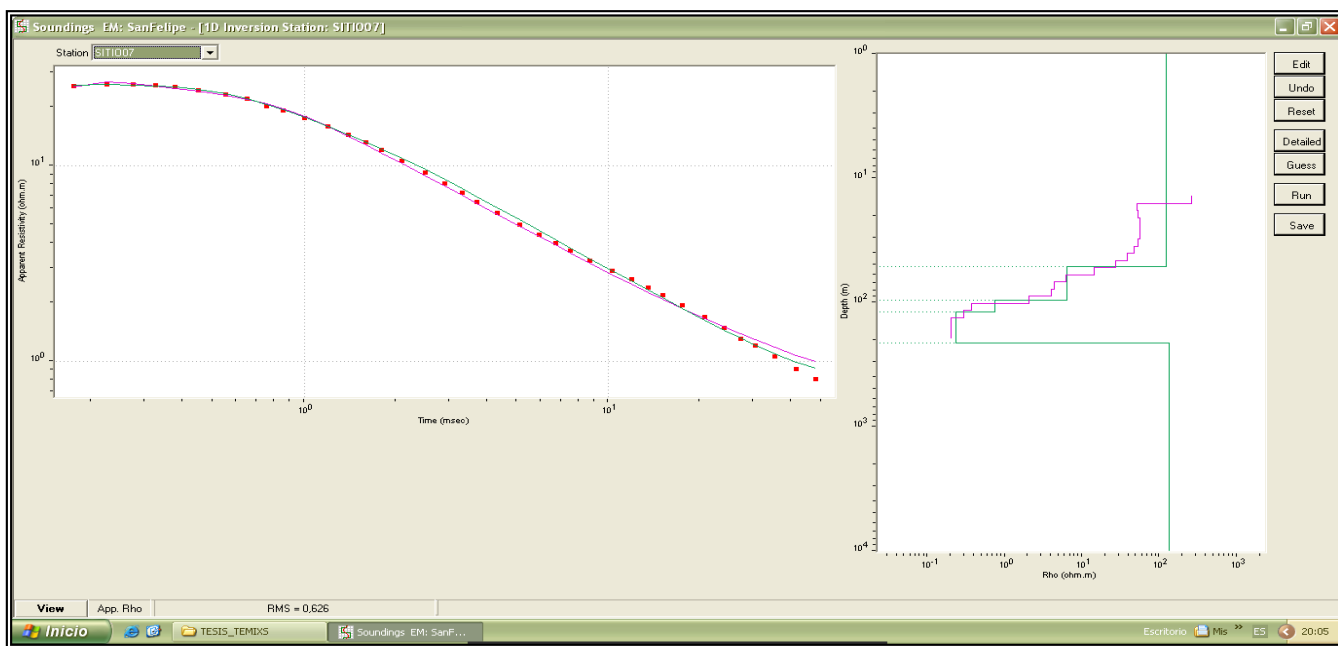
**Anexo 03. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 04.**



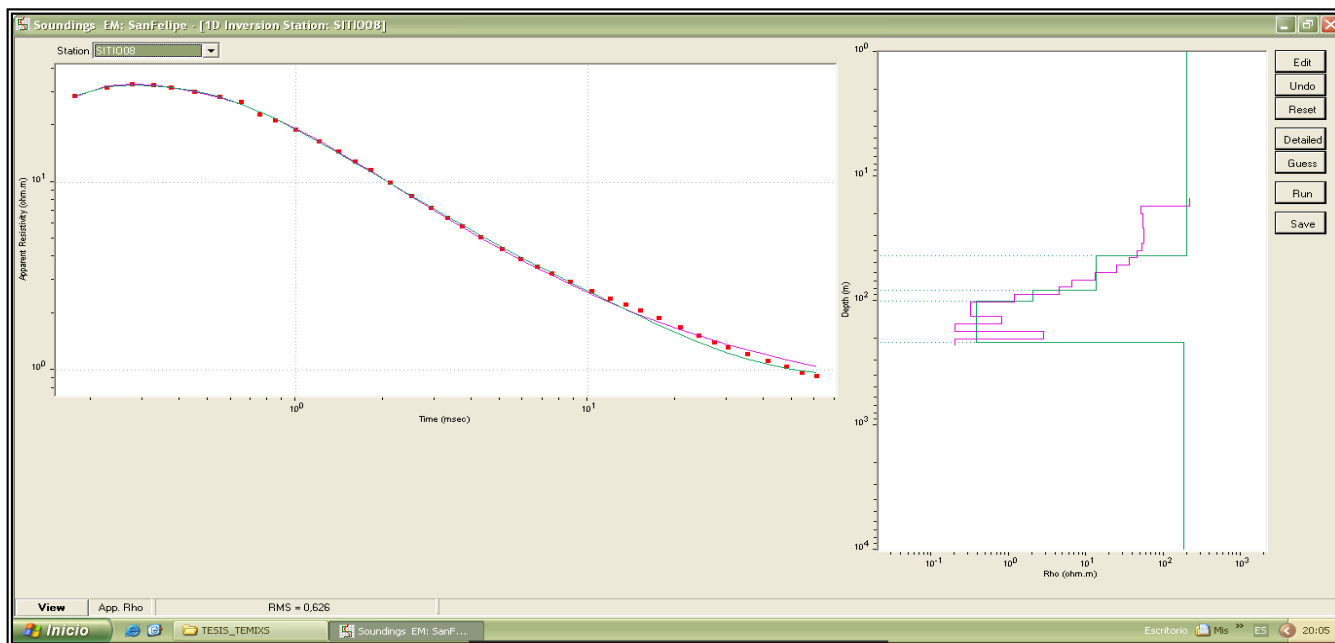
**Anexo 04. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 05.**



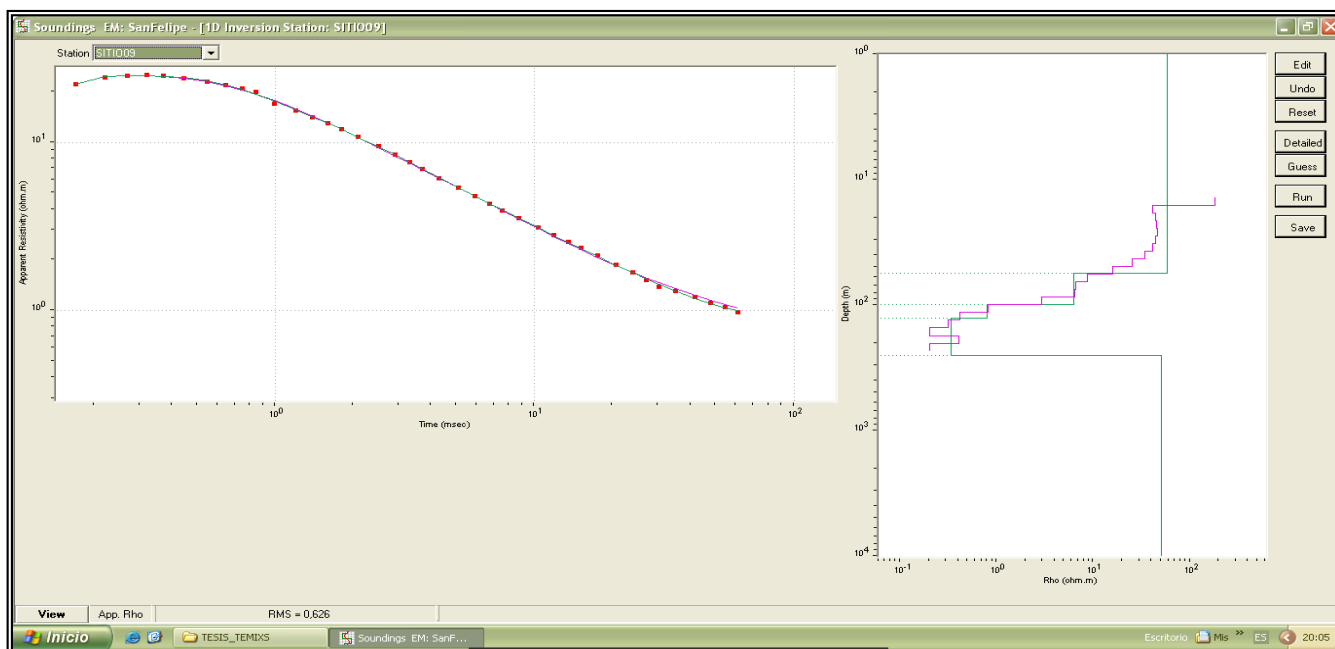
**Anexo 05. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 06.**



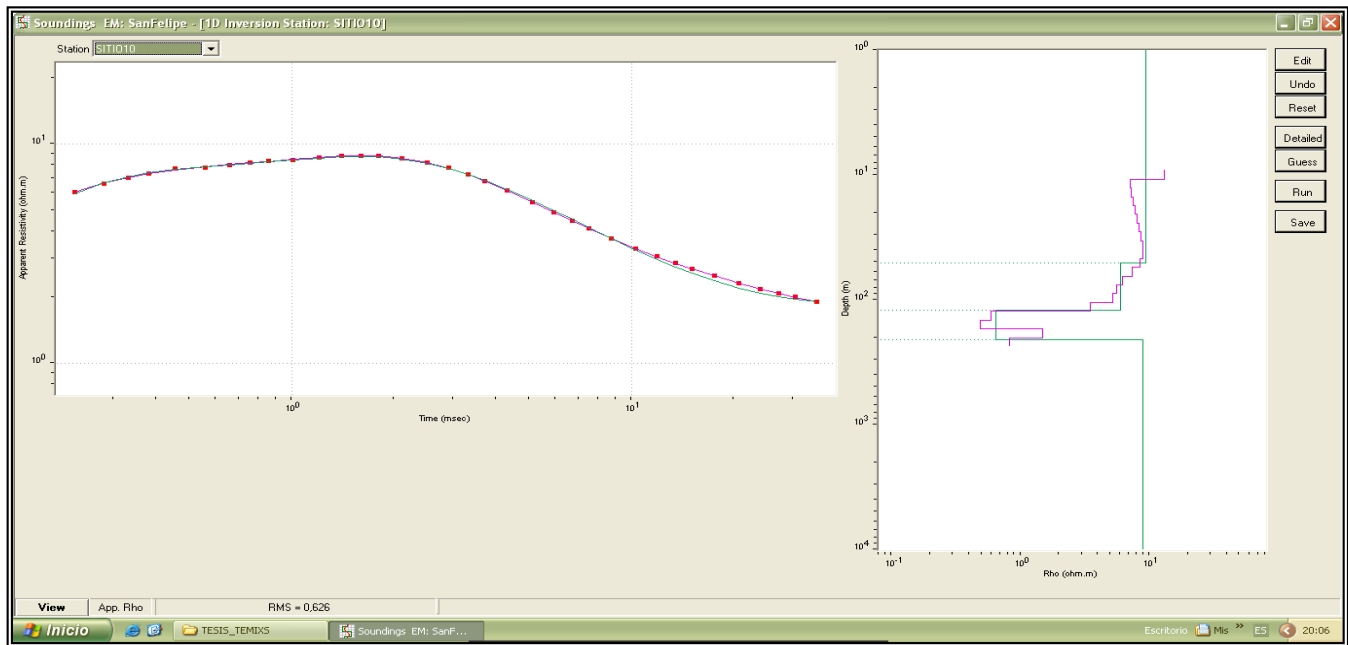
**Anexo 06. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 07.**



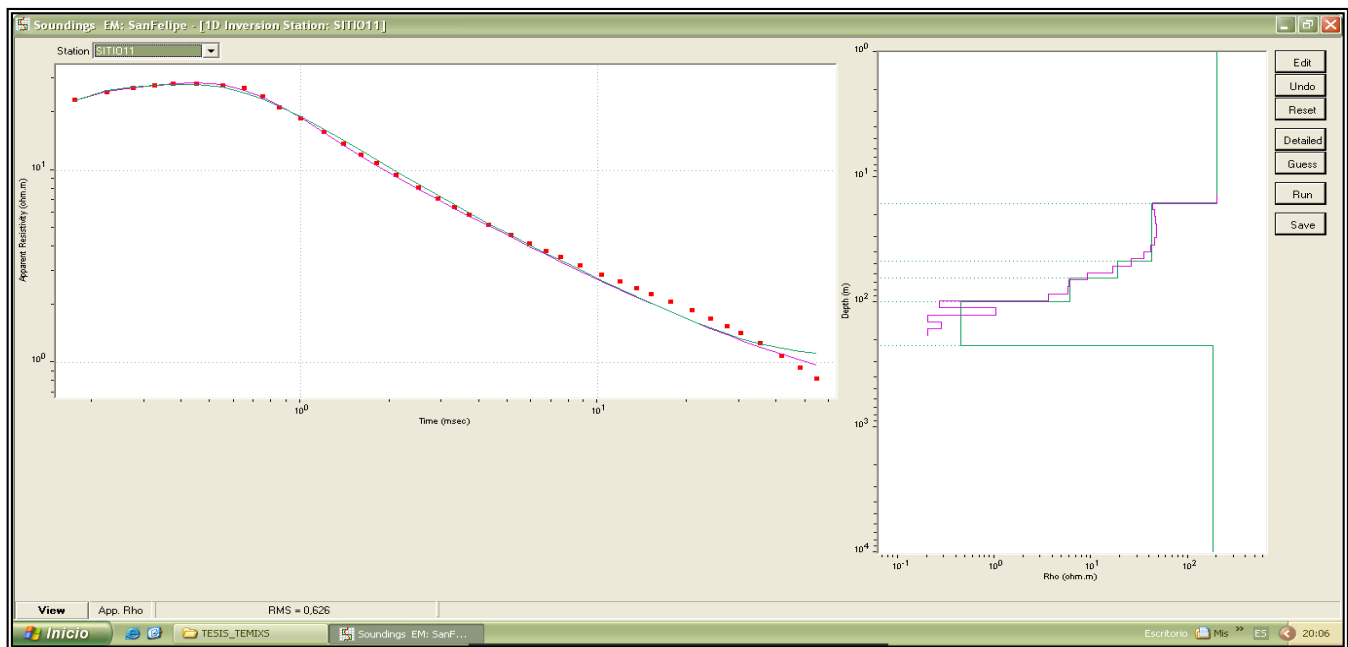
**Anexo 07. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 08.**



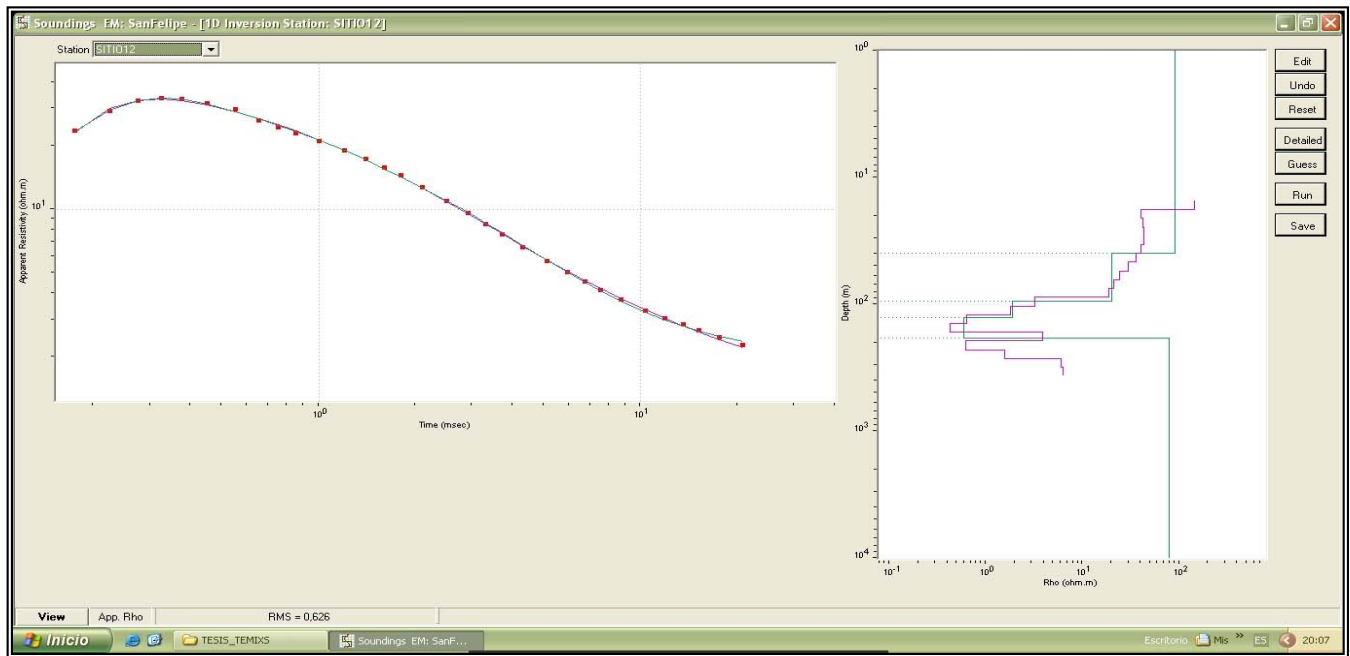
**Anexo 08. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 09.**



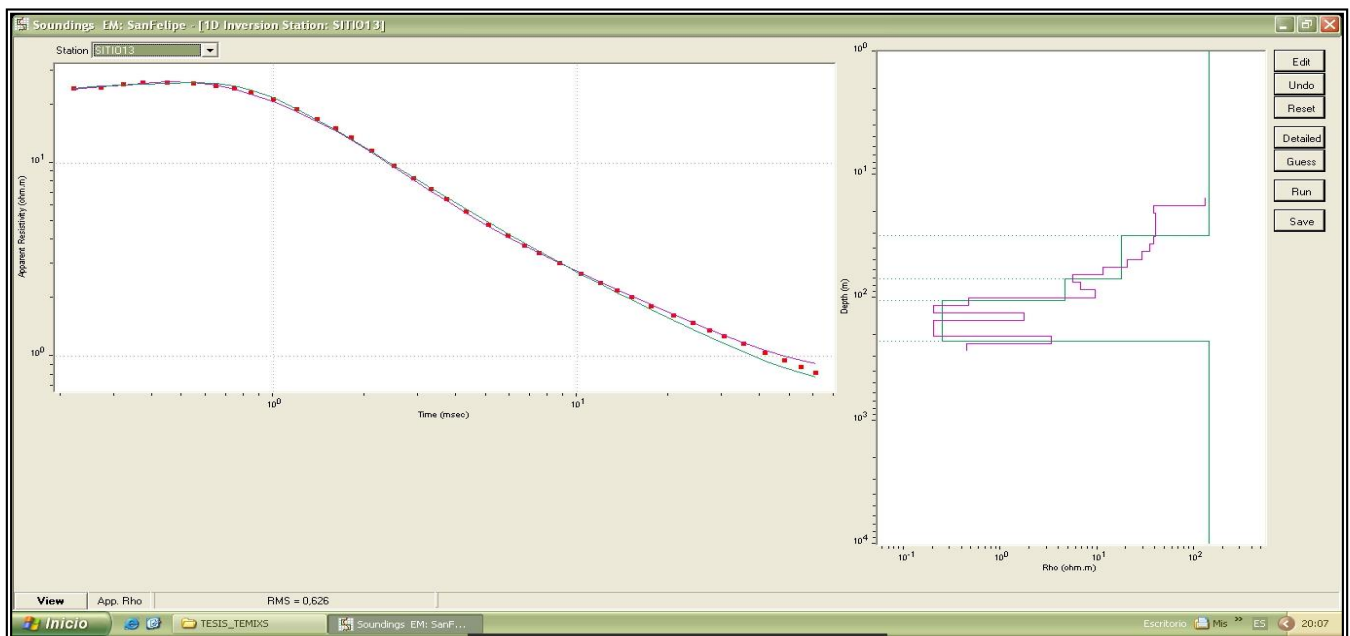
**Anexo 09. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 10.**



**Anexo 10. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 11.**

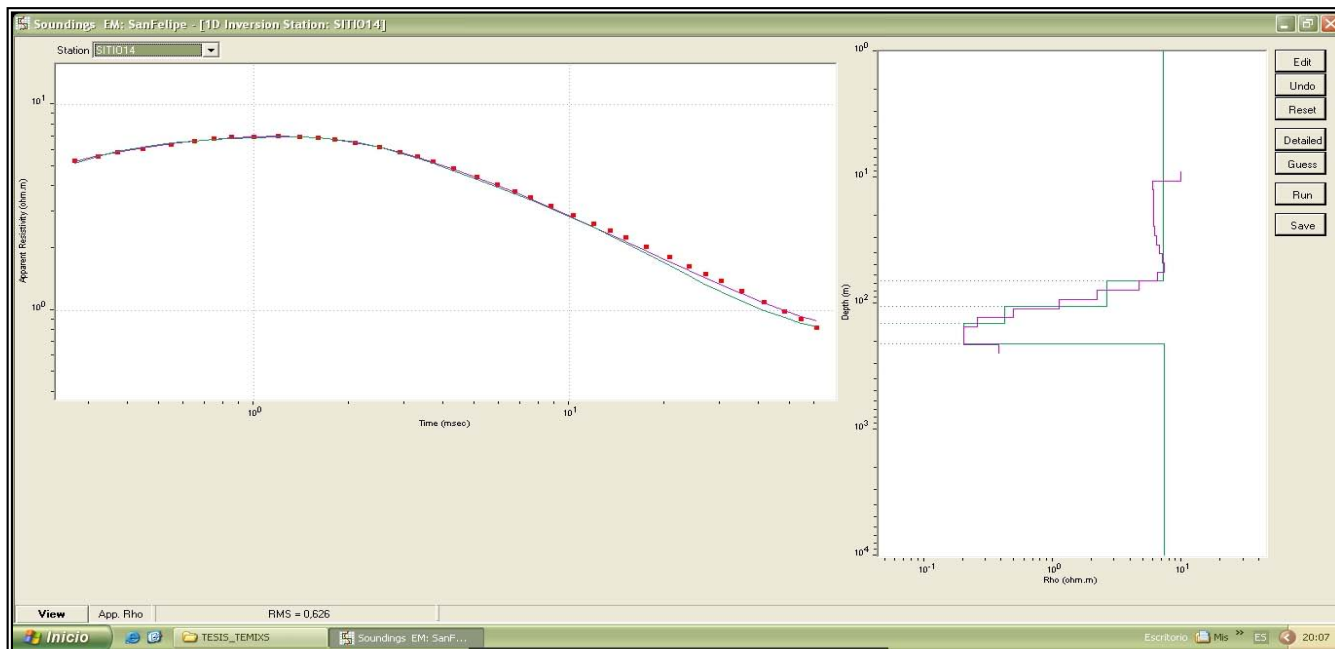


**Anexo 11. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 12.**

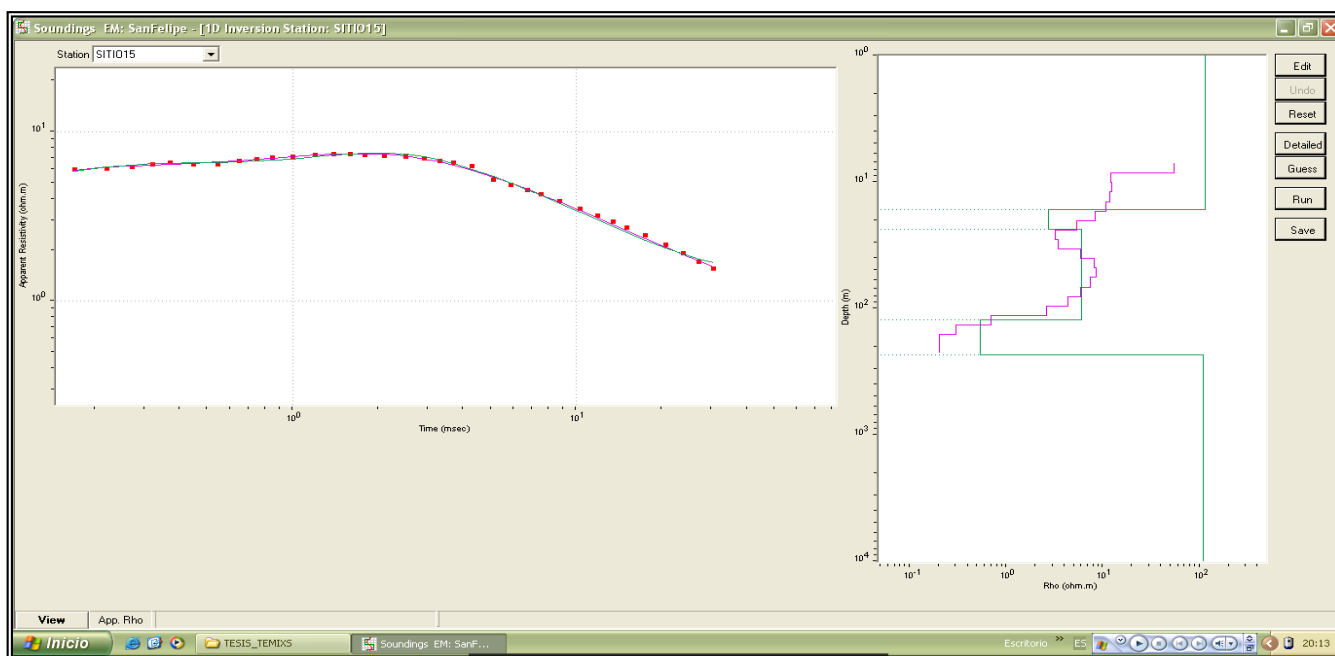


**Anexo 12. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 13.**

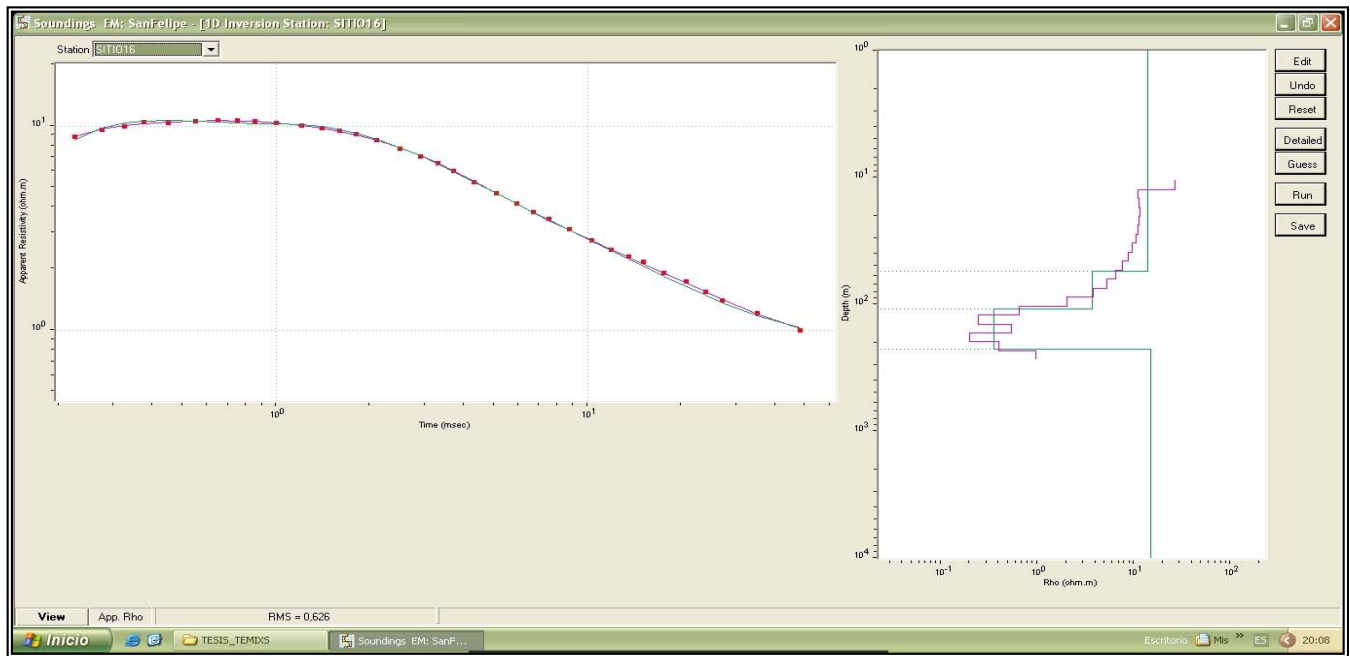




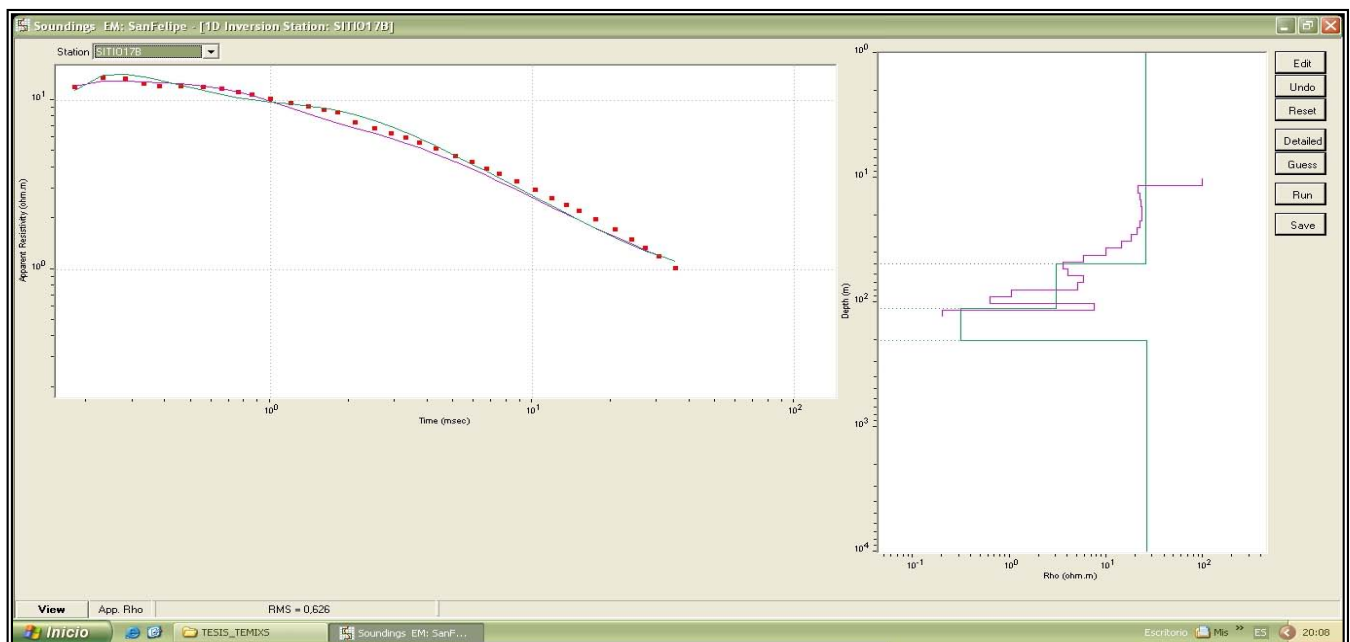
**Anexo 13. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 14.**



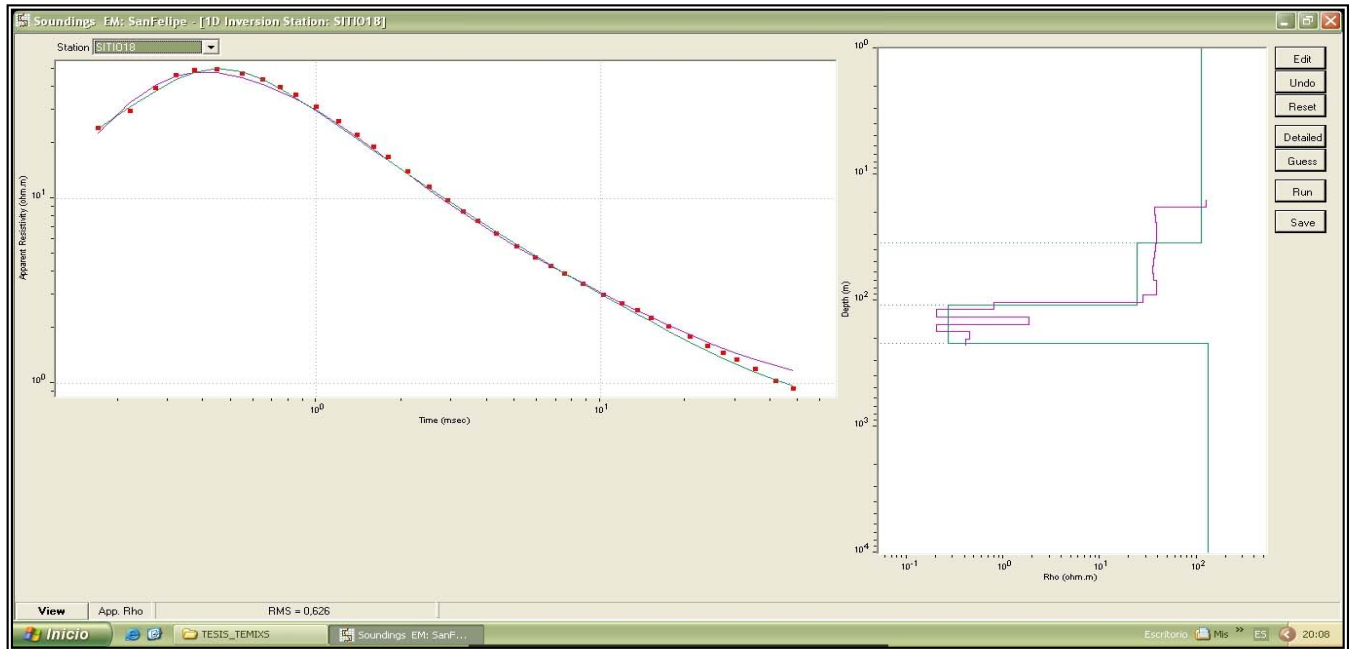
**Anexo 14. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 15.**



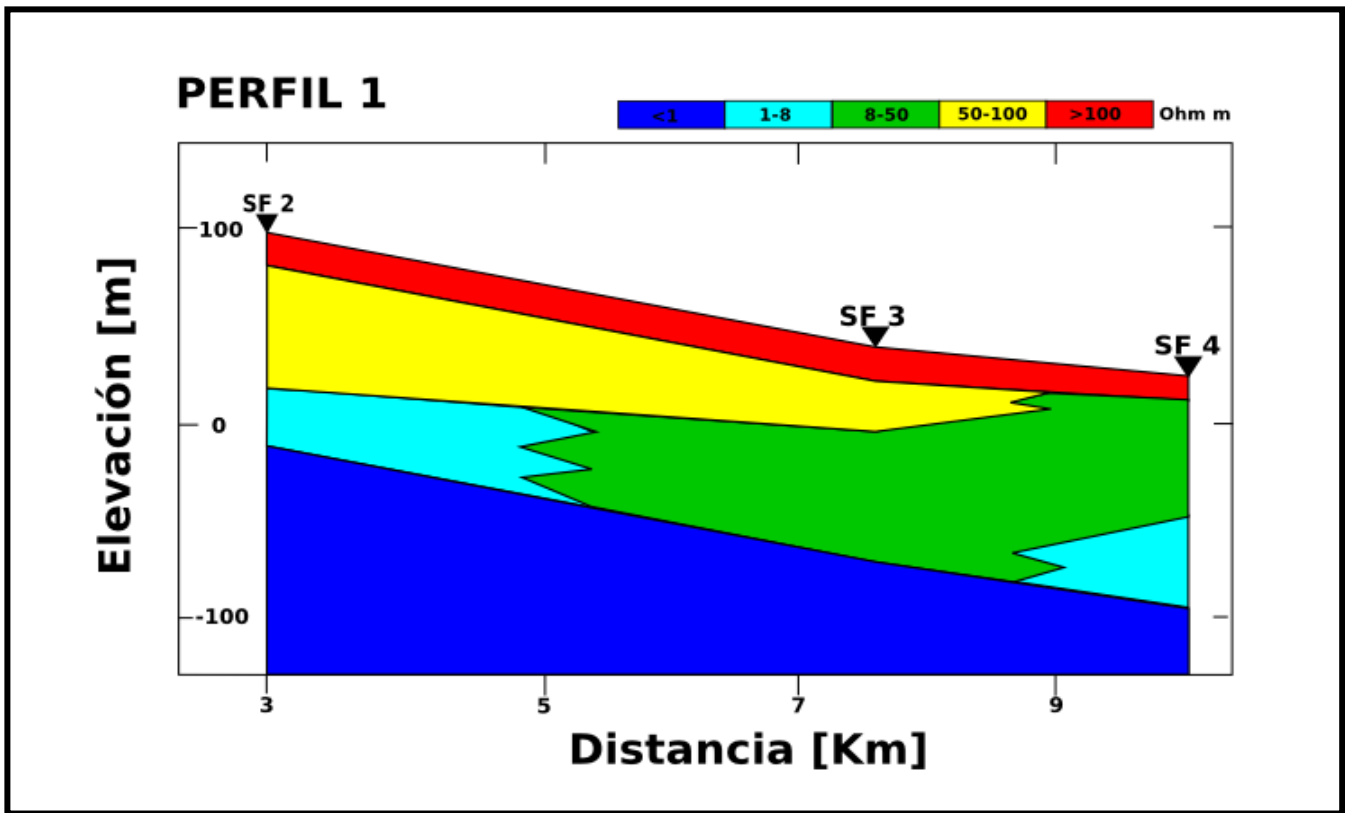
**Anexo 15. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 16.**



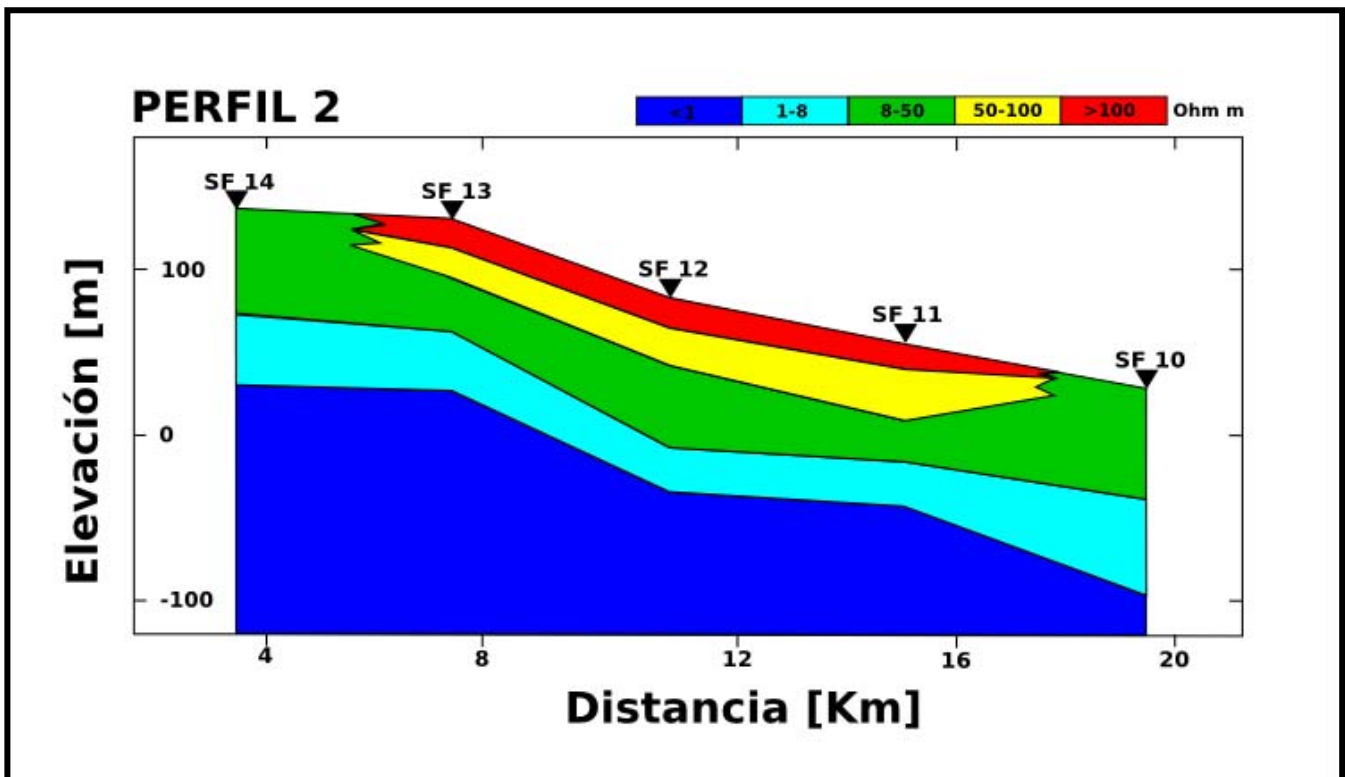
**Anexo 16. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 17.**



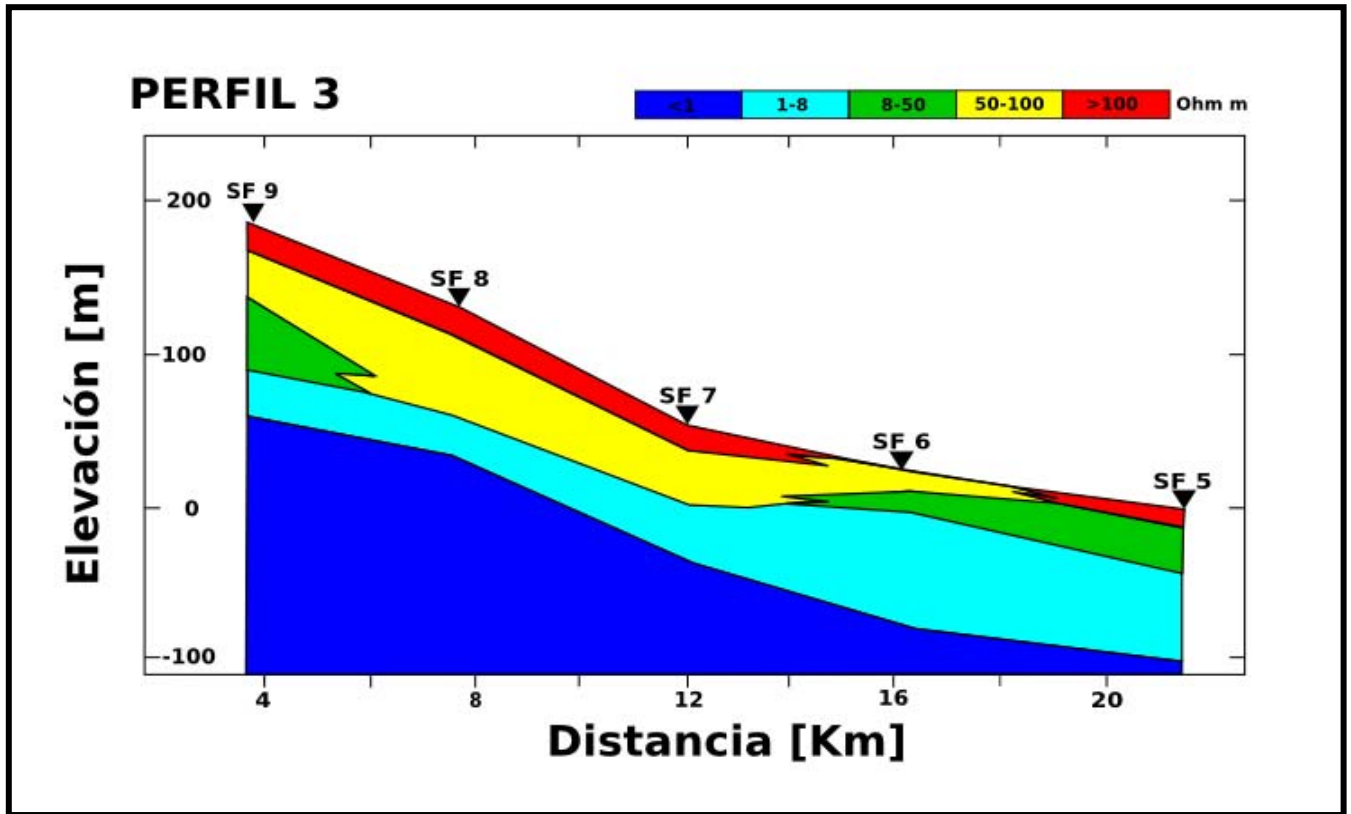
**Anexo 17. Curva de resistividad aparente y modelo geoelectrico del sitio 18.**



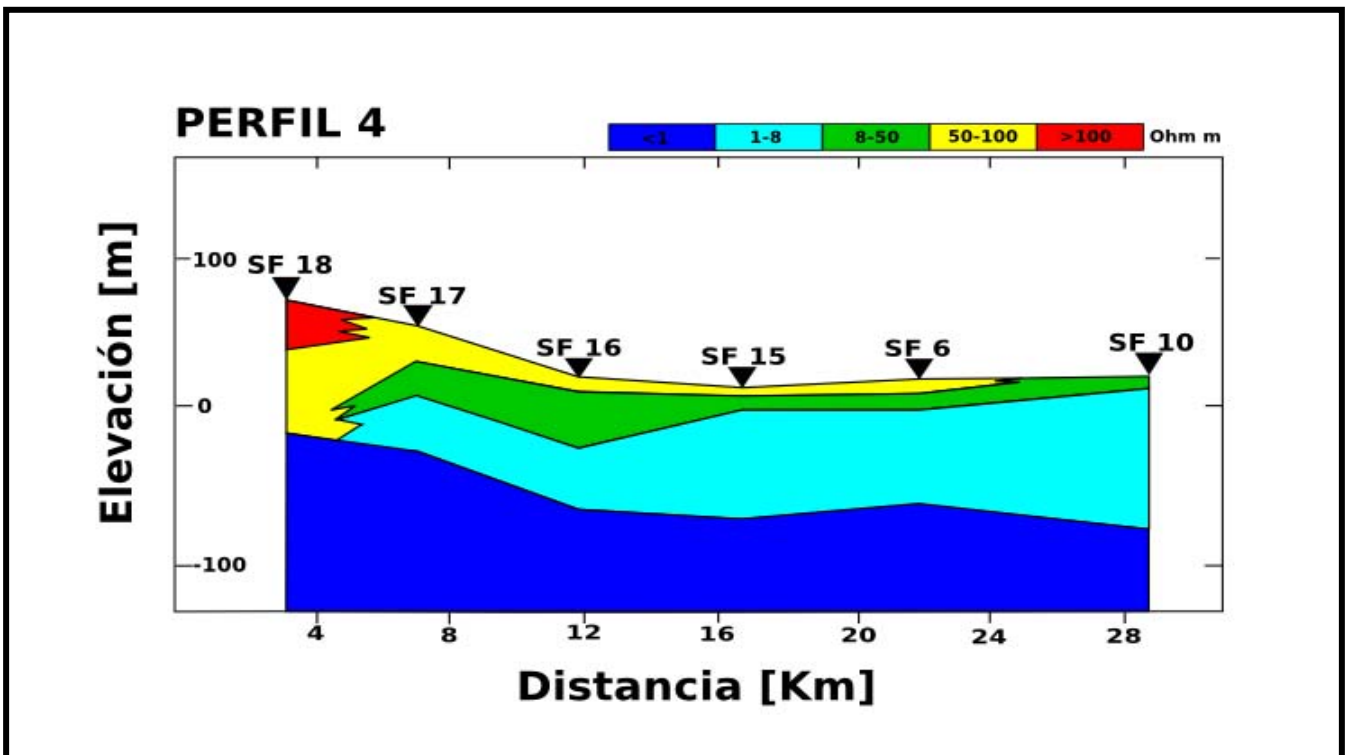
Anexo 18. Perfil geoelectrico 1 simplificado.



Anexo 19. Perfil geoelectrico 2 simplificado.



Anexo 20. Perfil geoelectrico 3 simplificado.



Anexo 21. Perfil geoelectrico 4 simplificado.