

## DETERMINACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN EL SUBSUELO POR HIDROCARBURO MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.

*C. Cuevas Urrutia<sup>1</sup>, A. Muñoz Jensen<sup>2</sup>, R. King St-Onge<sup>3</sup>*

### RESUMEN:

El uso de tomografía eléctrica en el estudio de suelos contaminados por hidrocarburos ha tenido un impacto sustancial dado que proporciona información valiosa acerca de la distribución espacial del contaminante en el subsuelo. Esta metodología fue aplicada para determinar si existe contaminación por hidrocarburo en la costa de la ciudad de Talcahuano, región del Bío Bío, donde se encuentra una gran concentración de industrias que utilizan hidrocarburos.

Los ensayos realizados no muestran evidencia de esta contaminación en el área, sin embargo, estos resultados no son concluyentes debido a que es necesario hacer análisis de otra naturaleza para confirmar los datos arrojados por tomografía eléctrica en el sector.

A pesar que los primeros resultados no muestran evidencia de contaminación por hidrocarburos, la zona de estudio es una zona de alto riesgo y deben tomarse algunas consideraciones en el eventual caso que se generara un derrame de contaminantes, para la contención de ésta y recuperación del suelo.

**Palabras clave:** Contaminación, hidrocarburos, Tomografía eléctrica.

### ABSTRACT:

The use of electrical tomography in the study of soils contaminated by hydrocarbons has had a substantial impact since it provides valuable information about the spatial distribution of the pollutant in the subsoil. This methodology was applied to determine if there is contamination by hydrocarbon on the coast of the city of Talcahuano, Bio Bio region, where there is a large concentration of industries that use hydrocarbons.

The tests carried out do not show evidence of this contamination in the area, however, these results are not conclusive because it is necessary to make other types of analysis to confirm the data obtained by electrical tomography in the sector.

Although the first results show no evidence of hydrocarbon contamination, the study area is a high risk area and some considerations should be taken in the event of a spill of contaminants, to the containment of this and recovery of the soil.

Key words: contamination, Hydrocarbon, Electrical tomography.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [ccuevas@ing.ucsc.cl](mailto:ccuevas@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, EMGG TerraData Ltda., Concepción, CHILE, [terradata.chile@gmail.com](mailto:terradata.chile@gmail.com)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rking@ucsc.cl](mailto:rking@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, cerca de 4.000 millones de toneladas de hidrocarburo deben extraerse anualmente para sostener los requerimientos de la sociedad moderna, lo que hace que los desastres ambientales relacionados con derrames de petróleo y sus derivados sean cada vez más frecuentes y sus impactos cada vez más significativos. En esta línea, los principales recursos impactados por estos accidentes son el suelo y el agua. Dada la importancia de ambos para la humanidad, es que su protección y recuperación cada vez toma más relevancia a nivel global. (López Blanco. 2005)

La contaminación por hidrocarburos es un tipo muy común de polución que se encuentra en todas las etapas de la industria: extracción de la materia prima, transporte de los productos y producción.

Estos contaminantes presentan un gran riesgo para la población debido que, al estar en contacto con el suelo pueden contaminar los cultivos o animales que consumen y provocar enfermedades. Estas consecuencias son igual de peligrosas si estos contaminantes pasan a la napa subterránea y las personas consumen esta agua.

El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características físicas y químicas, como su densidad, solubilidad, polaridad, entre otras. Sin embargo, las características del suelo toman un papel importante en la manera en la que el hidrocarburo viaja a través del mismo. La permeabilidad, el tamaño de grano de los materiales que componen el suelo y el contenido de humedad, así como la profundidad del nivel freático, son algunas de estas características. Así también, la resistividad del hidrocarburo depende de la litología que lo circunda, pudiendo reducir los valores establecidos de las rocas.

Generalmente las plumas contaminantes de hidrocarburo tienden a encapsularse, por lo que es fácil de reconocer en el subsuelo por medio de tomografía eléctrica, ya que estos métodos muestran la resistividad de la roca propia del lugar y una aureola que por lo general tiene menor resistividad que la roca o suelo que lo rodea. La resistividad de los hidrocarburos como se mencionó anteriormente depende de muchos factores, pero casi siempre fluctúa en un rango de 100 a 1.000 Ohm metros. (López Blanco. 2005)

En un principio este tipo de contaminación se estudia por medio de métodos geofísicos, ya que son superficiales y no alteran el sector, y posterior a esto en caso de encontrarse con alguna medición anómala se realiza un estudio más profundo en la zona.

El propósito de los estudios geofísicos realizados a través de los métodos eléctricos de prospección, también llamados Geo-eléctricos, es determinar la distribución de la resistividad eléctrica aparente  $[\rho_a]$  por medio de mediciones efectuadas en la superficie del terreno. Los resultados proporcionados permiten en principio identificar los cuerpos situados en el subsuelo. (Orellana, 1982; Loke, 2010).

Esta investigación busca determinar si existe contaminación por hidrocarburo en la ciudad de Talcahuano, región del Bío Bío, Chile, más específicamente en las cercanías de la empresa Huachipato, mediante análisis de resistividad eléctrica, debido a que en esta zona hay un alto movimiento de maquinarias y uso de este combustible, esto podría generar desechos de hidrocarburos, que al ser eliminados o mal manipulados podrían contaminar el sector y afectar a la población que vive en esta zona.

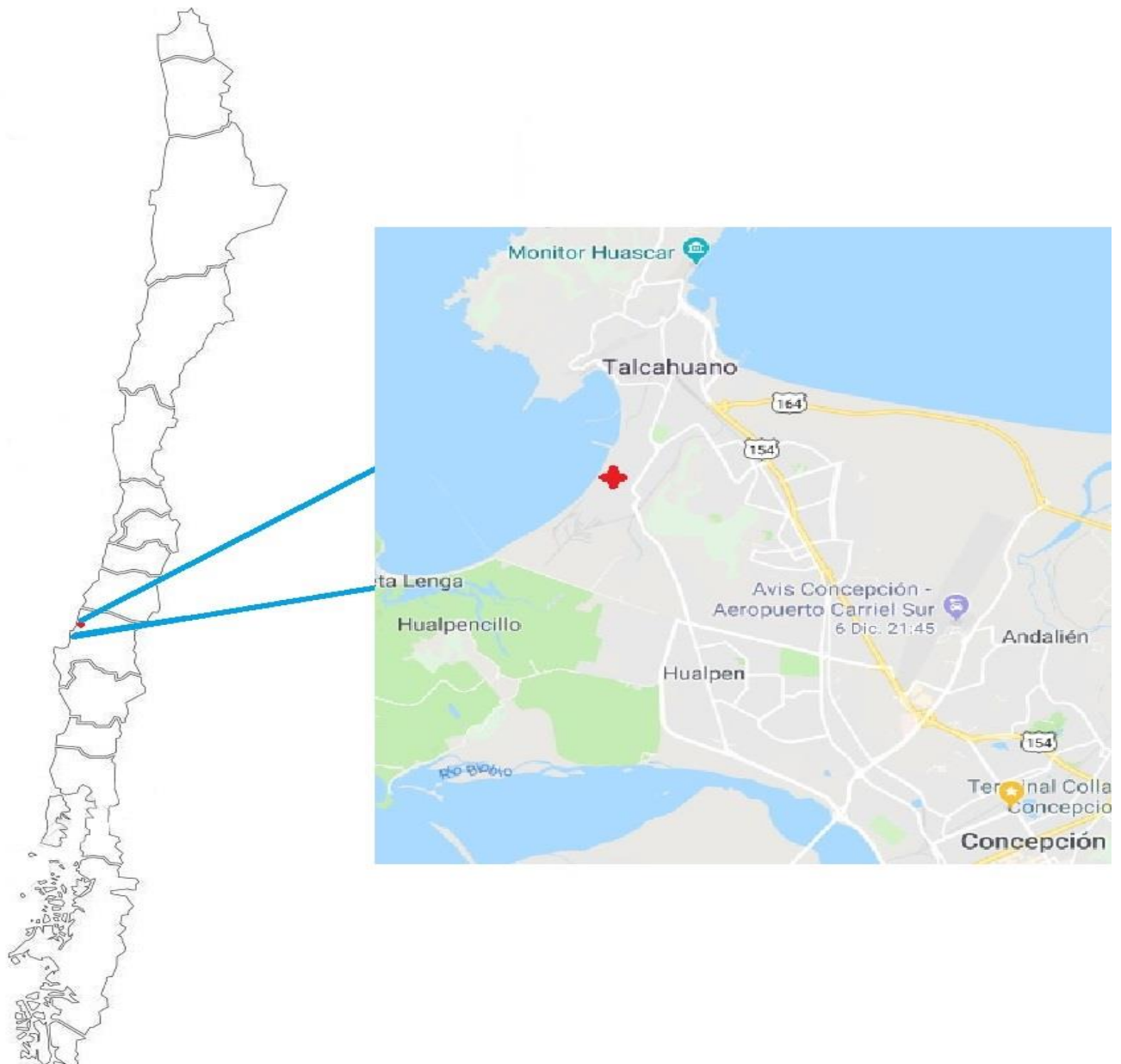
Para esto se va a estudiar si el método acá propuesto es aplicable a esta zona; en el caso que sea aplicable se realizan mediciones en la superficie para finalmente generar un catastro de la contaminación si existiera.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Área de estudio

Talcahuano es una ciudad perteneciente a la provincia de Concepción, fue fundada en el año 1764. Esta ciudad posee una superficie de 92,3 Km<sup>2</sup> y una población de 151.749 habitantes aproximadamente (INE, 2017).

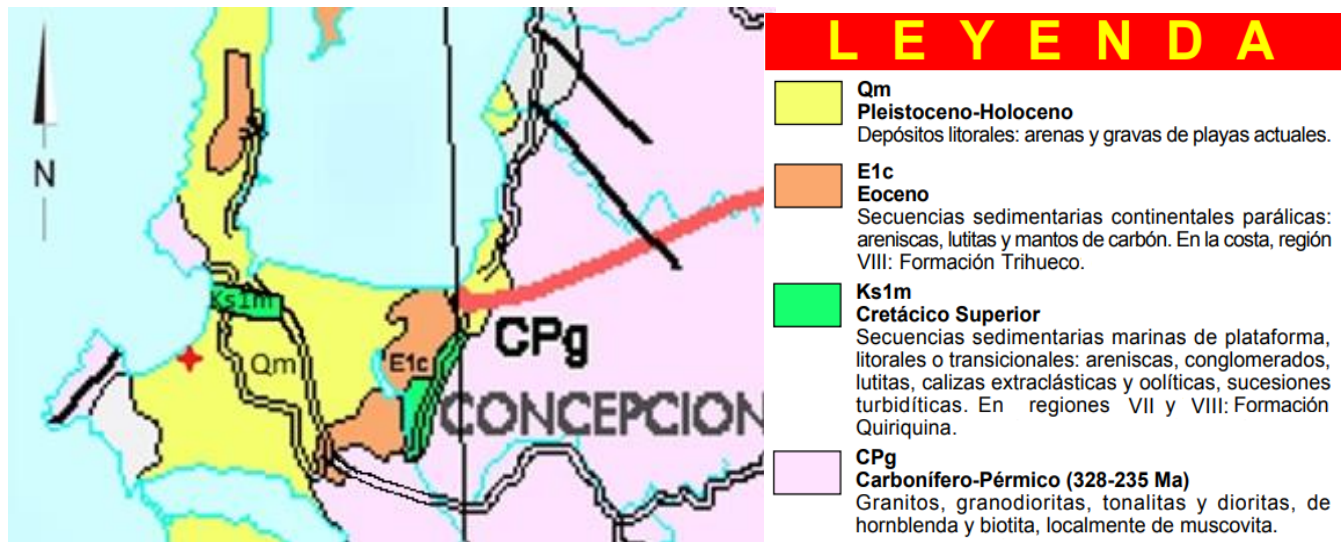
El lugar de estudio se encuentra al sur este de la plaza de Talcahuano, su ruta principal de acceso es por la autopista Gran Bretaña. Figura 1.



**Figura 1:** Vista general de la ubicación de la zona de estudio y de los puntos ensayados, modificado de Google Earth. Elaboración propia.

## 2.2 Geología General

La zona de estudio se encuentra, según el mapa de SERNAGEOMIN del 2003 (Figura 2), en el sector marcado con la cruz roja que geológicamente corresponde a la simbología Qm, pertenece al Pleistoceno-Holoceno, correspondiendo a depósitos litorales. La secuencia de las formaciones y depósitos del sector se muestran en la leyenda de la Figura 2 ordenadas desde las más actuales a las más antiguas.



**Figura 2:** Mapa geológico, Modificado de Carta geológica de escala 1:1.000.000; SERNAGEOMIN, 2003.

## 2.3 ENSAYOS GEOFISICOS

### 2.3.1 Conceptos básicos de la prospección eléctrica

La resistividad es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado y sus unidades son Ohm metros [ $\Omega \cdot m$ ]; sin embargo, igualmente puede considerarse como la facultad de paso, resultando así el concepto de conductividad, que es el inverso de la resistividad, y expresado matemáticamente queda como:

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

Donde:  $\sigma$ : Conductividad eléctrica;  $\rho$ : Resistividad eléctrica.

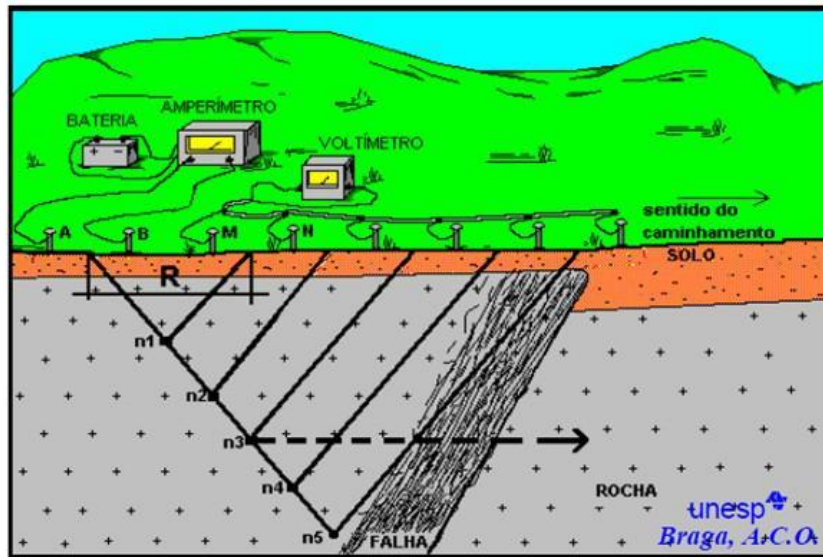
A través de la inyección de corriente eléctrica al suelo y la medición de la variación de voltaje se puede calcular la resistividad aparente por medio del campo eléctrico generado.

Para establecer un campo eléctrico será necesario el uso de un generador de corriente, como una batería, que será conectado al par de electrodos de cobre o acero, parcialmente clavados en el subsuelo. Como el tamaño de estos es relativamente pequeño, se puede considerar que los electrodos se reducen a puntos situados en el suelo.



### 2.3.2.1 Arreglo Dipolo - Dipolo

En el arreglo dipolo - dipolo los electrodos se disponen sobre una línea, primero se colocan las estacas  $C_1, C_2$  que es por donde se inyecta la corriente y luego las estacas  $P_1, P_2$  que es por donde se mide el voltaje. Para este arreglo hay que tener en cuenta que el espaciamiento entre los electrodos  $C_1$  y  $C_2$  es igual al que hay entre  $P_1$  y  $P_2$ , el espaciamiento entre los dipolos  $C_1, C_2$  y  $P_1, P_2$  puede variar, utilizándose simultáneamente, varios dipolos  $P_1, P_2$  dispuestos a lo largo de la línea, donde cada dipolo representa un nivel de investigación. Figura 4. (Braga, 2006)



**Figura 4:** Representación de la disposición del Dipolo - Dipolo, Tomado de Braga, 2006

El arreglo dipolo - dipolo calcula la resistividad aparente del suelo por medio de la siguiente ecuación.

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

Donde:  $\rho_a$ : Resistividad aparente [ $\Omega \cdot m$ ];  $n$ : Nivel de profundidad;  $a$ : Espacio entre los electrodos [m];  $I$ : Corriente eléctrica [A];  $\Delta V$ : Variación de Voltaje [V].

### 2.3.3 Sondeo eléctrico vertical (SEV)

El método SEV consiste en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de estacas dispuestas en forma lineal y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción.

El objetivo de un SEV es la obtención de un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie. La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia entre los electrodos de corriente, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas (Auge. 2008)

En general para registrar un SEV se requiere:

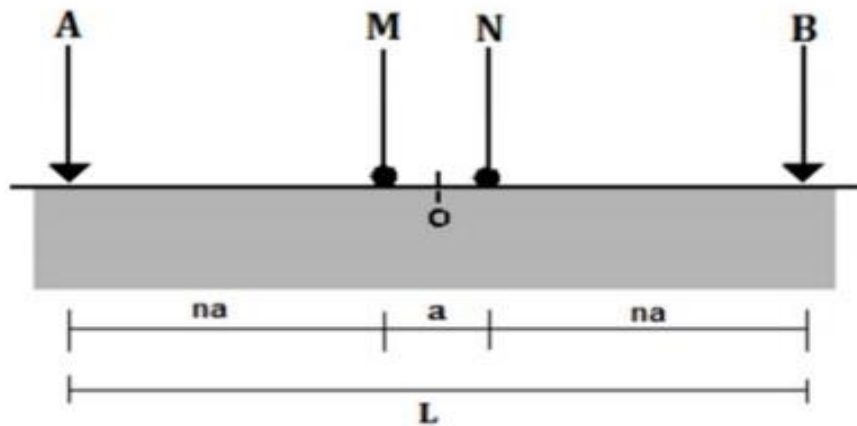
- **Circuito de emisión:** integrado por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de la corriente, puntos de emisión (A y B) consistentes en clavos metálicos y cables de transmisión.

- **Circuito de recepción:** compuesto por un milivoltímetro electrónico de alta impedancia y dos electrodos para la medición del potencial (M y N) impolarizables. (Auge, 2008).

### 2.3.3.1 Arreglo Schlumberger.

El método de Schlumberger es un tipo de SEV y emplea 4 electrodos, donde la separación entre los electrodos centrales o de potencial (a) se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (na) de la separación base de los electrodos internos (a). (Loke, 2010)

La configuración correspondiente a este método de medición, se muestra en la Figura 5.



**Figura 5:** Configuración del modelo de Schlumberger tomada de Loke, 2010

La resistividad aparente por medio de este arreglo está definida por la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \pi \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{2MN} \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

Donde:  $\rho_a$ : Resistividad aparente [ $\Omega \cdot m$ ]; AB: separación entre electrodos de emisión [m]; MN: separación de electrodos receptores [m];  $\Delta V$ : Variación de voltaje [V]; I: corriente inyectada [A].

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requiere conocer las resistividades de capas más profundas. (Loke, 2010).

### 3. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto el primer paso fue seleccionar el lugar; este sector se ubica en las cercanías de la empresa de Huachipato CAP, debido al alto tráfico de maquinarias y utilización del contaminante en estudio que posee este lugar. Luego fue necesario realizar un estudio bibliográfico en busca de antecedentes sobre algún tipo de derrame o evidencia de contaminación que pudiera haber existido en la zona.

Se revisó la parte teórica de los métodos utilizados, para ver los alcances de éstos y si eran acordes a los objetivos del proyecto, además se estudió sobre la correcta toma de datos en terreno para reducir al mínimo el error generado por esta causa.

Antes de fijar las fechas para las mediciones fue necesario mirar constantemente el pronóstico del tiempo dado que con lluvia no se puede medir, ya que al trabajar con corriente esto podría ser un peligro además los datos podían ser alterados.

A continuación, se marcó cada punto que fue medido, utilizando un GPS para obtener las coordenadas y poder georreferenciar los puntos de medición. Para medir en la zona de interés fue necesario un mínimo de tres personas: dos para medir el potencial eléctrico (una persona llevó la hoja para ingresar los valores medidos y la otra el multímetro) y una tercera persona que maneje el transmisor de inyección de corriente.

Se realizaron mediciones en 2 puntos distintos del sector (Figura 6), en cada punto se realizaron 2 SEV de 100 m AB y 1 dipolo – dipolo de 100 m de largo.



**Figura 6:** Mapa de los dos sectores ensayados, Elaboración propia.

Para realizar las mediciones SEV como las mediciones de Dipolo - Dipolo, se requirió de un equipo de resistividad aportado por Terradata.

El equipo de resistividad ocupado fue GEO2 que cuenta con un transmisor de corriente continua con una capacidad de inyección máxima de 800 - 900 [mA]. Además, este equipo tiene una alimentación a fuente de 220 [V] la cual fue proporcionada por medio de un generador, una inyección por conexiones dipolares para electrodos y monitoreo de corriente de inyección a través de multímetro digital Fluke. Este equipo cuenta con un switch de cambio de polaridad y un medidor de voltaje a través de multímetro digital UNI-T.

Para hacer funcionar el equipo es necesario contar con elementos que envíen y reciban la corriente, en este caso se utilizarán estacas de acero no polarizables de 40 cm de largo y los cables y alambres son conductores de cobre.

#### **4. RESULTADOS E INTERPRETACION.**

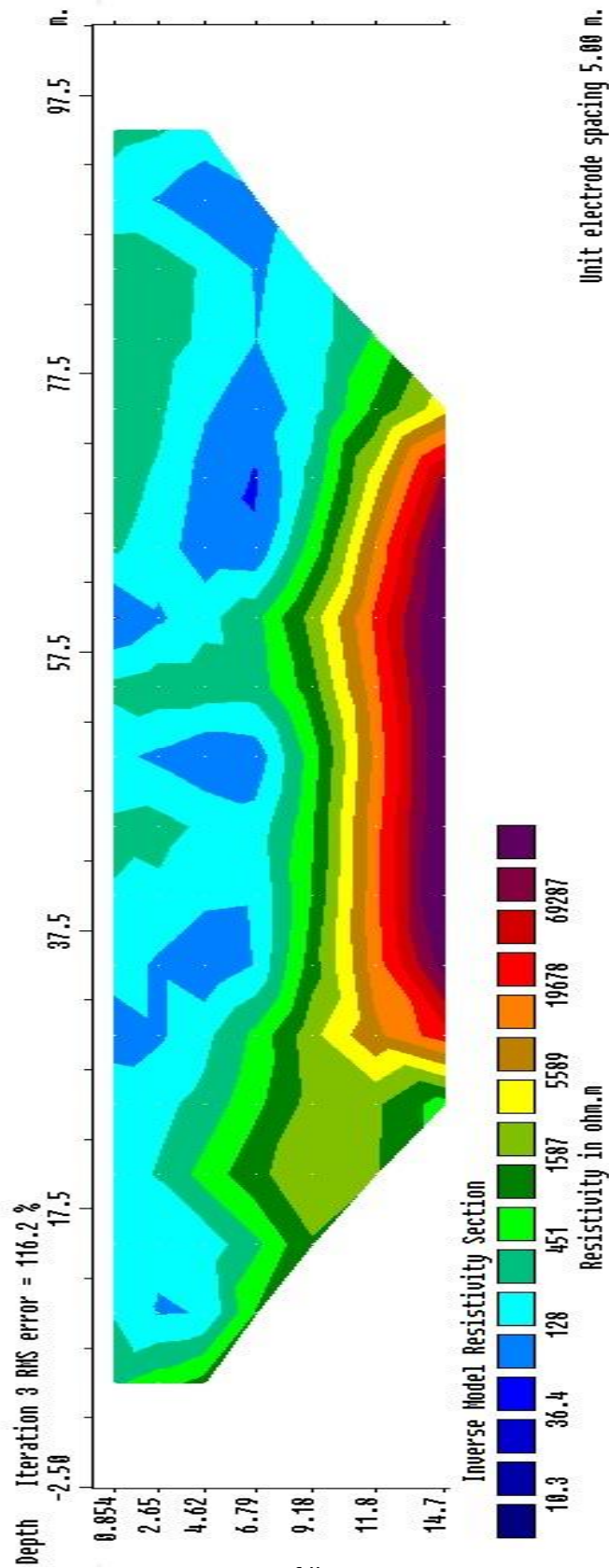
Mediante el software Res2Dinv, desarrollado por Landviser se analizaron los datos del dipolo - dipolo del punto N°1 (Figura 7) y el punto de estudio N°2 (Figura 9), además se analizaron los datos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) por medio del software IPI2win desarrollado por la universidad de Moscú para corroborar la información entregada por el dipolo-dipolo del punto N°1 (Figura 8) y el punto N°2 (Figura 10).

##### Punto 1.

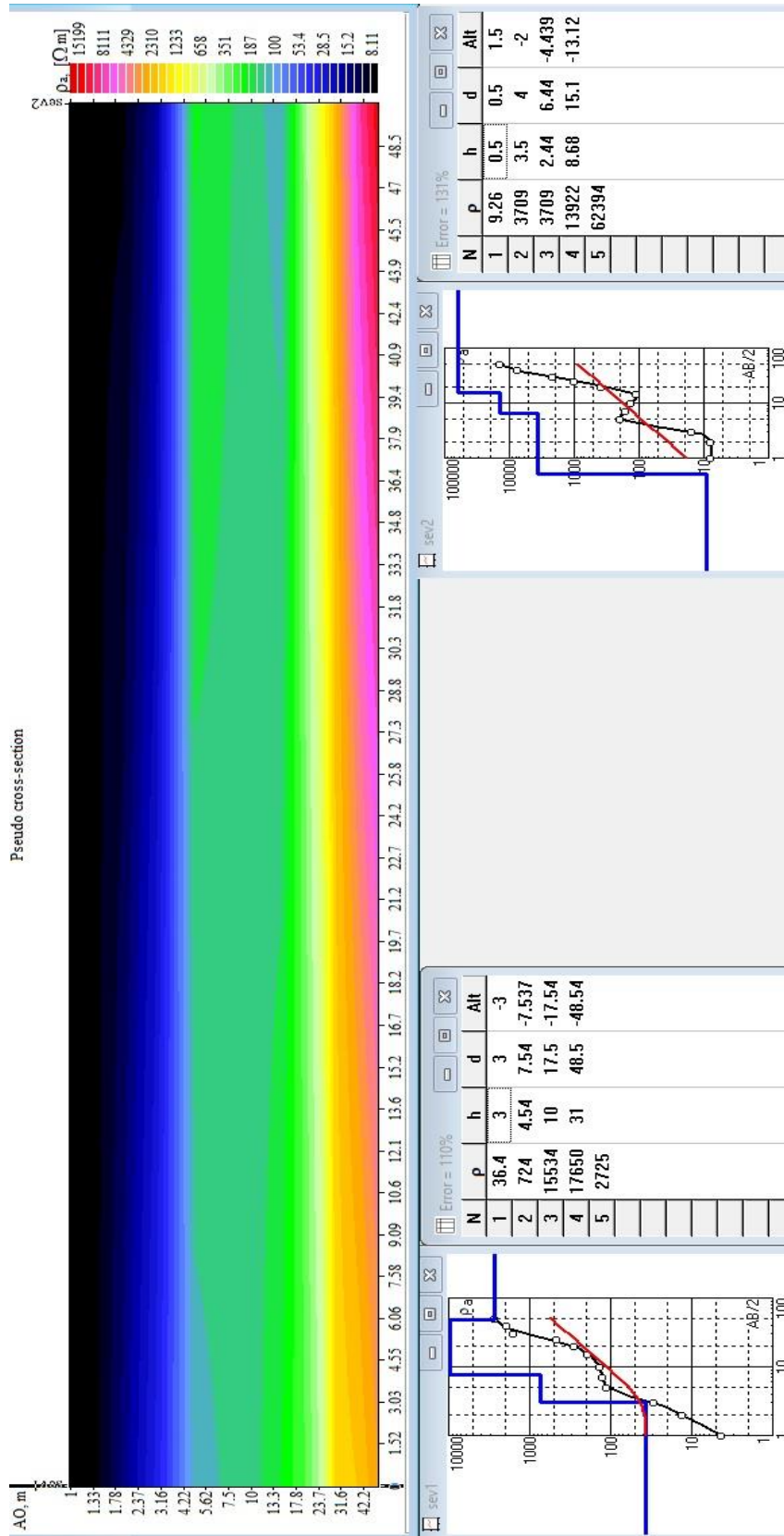
En la Figura 7 y 8 se encuentra consistencia entre el dipolo-dipolo y los SEV realizados en el Punto 1. Se ven claramente estratos más o menos horizontales, sin ninguna anomalía aparente, por lo que no se encuentra evidencia que podría indicar presencia de plumas de hidrocarburos. En los primeros metros de ambos métodos se ven resistividades bajas, lo que concordaría con la humedad observada en terreno del suelo, que es superficial y de tipo orgánico, al tener estas bajas (30 a 200 Ohm metros) resistividades estos suelos tienden a absorber sustancias que podrían eventualmente derramarse en la zona. A medida que se va analizando el modelo más en profundidad, cercano a los 12 metros aproximadamente, se encontró resistividades más elevadas alrededor de los 10.000 [ohm metros] lo que indica que podría ser roca sedimentaria, más precisamente arenisca; esto concuerda con la geología del sector.

El método SEV llega a una profundidad aproximada de  $AB/3$ , como el tramo AB máximo utilizado es de 100 metros la profundidad máxima a la que podría llegar el método sería de aproximadamente 33 metros.

Lo anterior ayuda a corroborar y completar la información obtenida por medio del dipolo-dipolo, ya que igual entrega resistividades y fue realizado en los mismos lugares que el método anterior.



**Figura 7:** Resistividad por medio del método de dipolo - dipolo en el punto 1.



**Figura 8:** Resistividad por el arreglo Schlumberger en el punto 1.

## Punto 2.

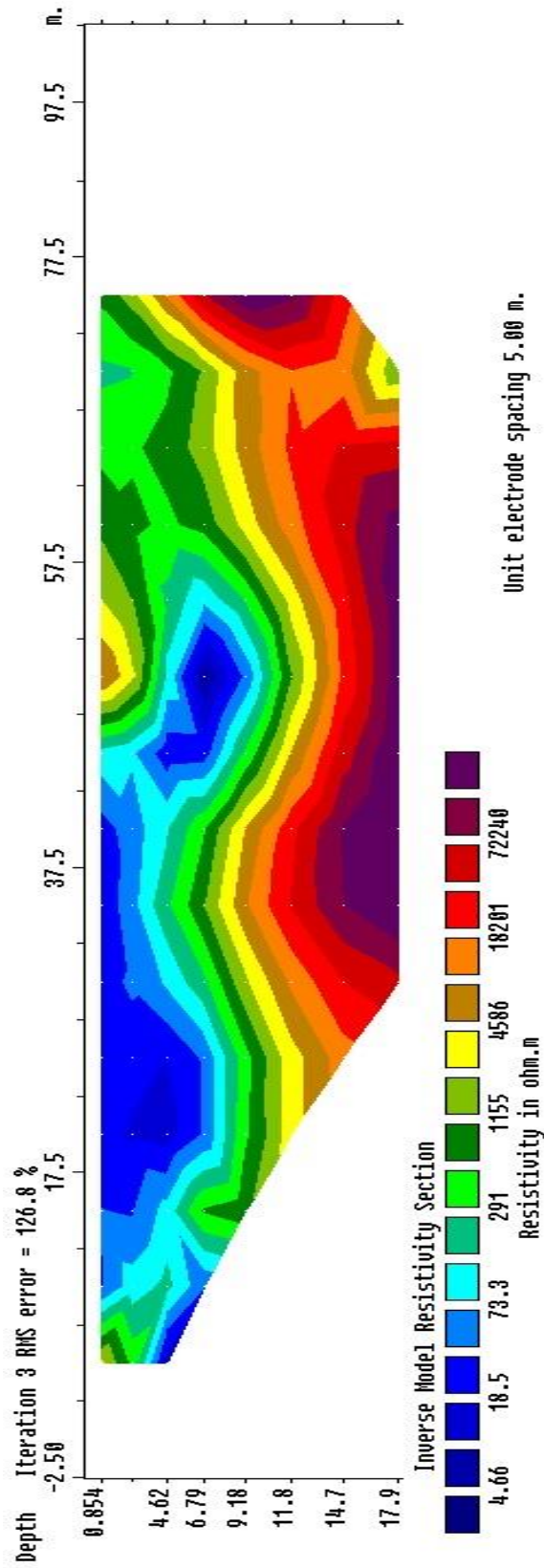
Al realizar el análisis del punto 2 se encontraron algunas irregularidades, por ejemplo, se debió eliminar un punto escapado que arrojaba cero de resistividad para que el programa pudiera correr, esto está incluido dentro del margen de error que considera el software. Además, este gráfico no pudo ser completado debido a que las condiciones meteorológicas no permitieron realizar el total de las mediciones.

Estas mediciones fueron hechas sobre suelo orgánico, frente a una planta química en las cercanías de Huachipato. Si bien el riesgo principal de esta zona son los químicos, este proyecto se enfoca en analizar la contaminación por hidrocarburos del transporte y funcionamiento de las maquinarias de dicha planta. En la línea de medición de este punto había un canal que había sido encausado por medio de tubos de concreto lo que posiblemente hace que en la parte derecha de la Figura 9 la resistividad comienza a aumentar a medida que se acerca a la superficie (20 a 4000 ohm metros), al igual que en el punto 1. Además de las anomalías propias del terreno, no se observa evidencia de plumas de contaminación.

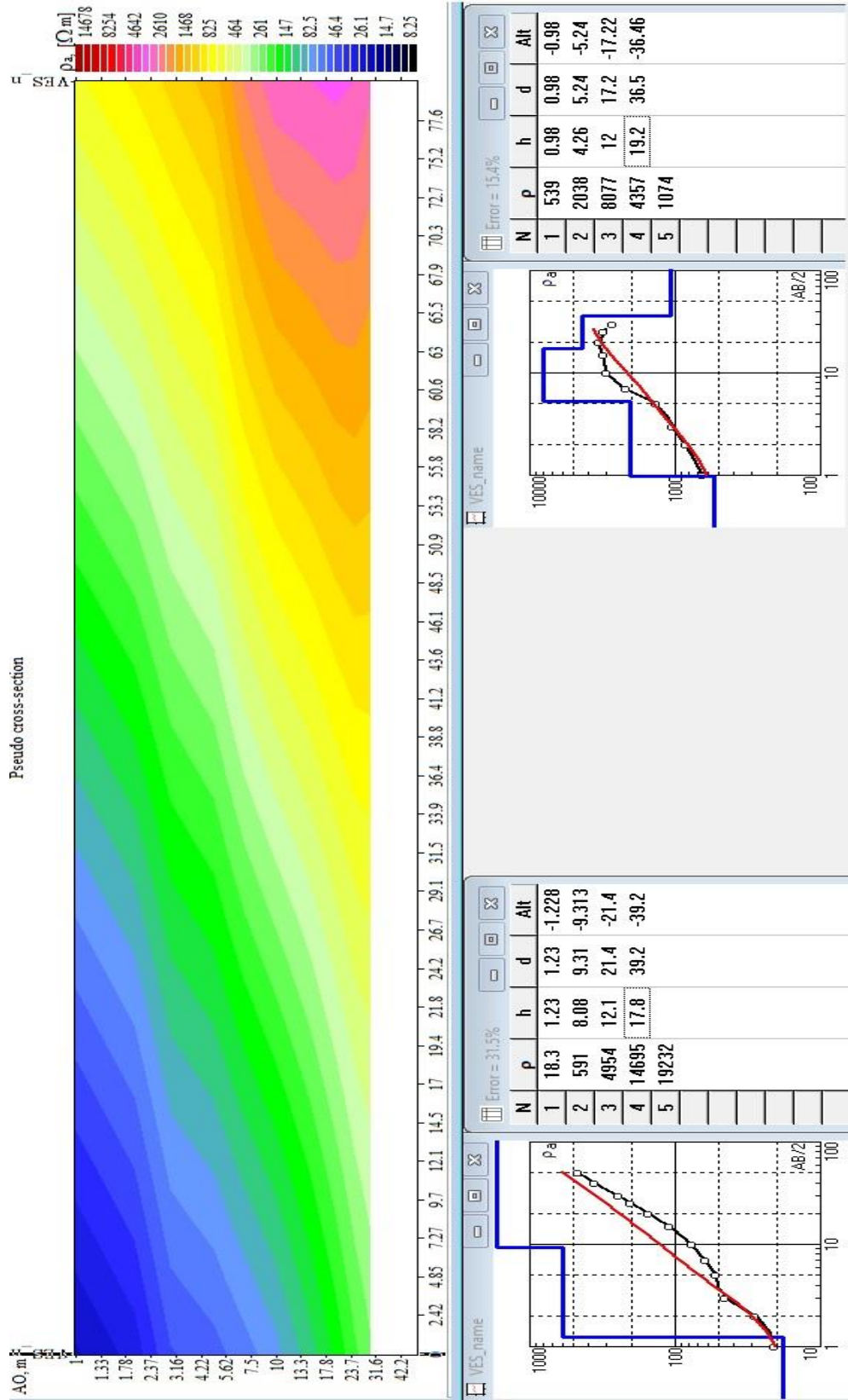
En la Figura 10 se encuentra el modelo SEV mediante el arreglo de Schlumberger. En esta sección se ve la variación de resistividad son más diagonales. Al comparar esta sección con el realizado en el mismo punto, pero por el método dipolo-dipolo, se encuentra que los dos métodos coinciden. Mientras más a la derecha de la sección se observa que la resistividad es mayor al acercarse a la superficie.

Mediante el método SEV tampoco se encontró evidencia de plumas contaminantes de hidrocarburo en el sector. Sin embargo, a pesar de no encontrar evidencia de contaminación en la zona de estudio, estos datos no son concluyentes, por lo que se necesita un estudio más acabado y con otros métodos para descartar por completo la presencia de contaminación que podría afectar al entorno, como análisis geoquímicos e hidroquímicos.

Sin embargo, es importante saber que al verse ante una emergencia ambiental, como las tratadas en este proyecto, con escasa frecuencia, pequeños derrames de hidrocarburos pueden contenerse efectivamente excavando el suelo contaminado y conteniéndolo en un relleno de seguridad autorizado, sin embargo en otros casos, mucho más repetidos, el volumen de suelo contaminado no puede excavar, transportarse y contenerse en una instalación especializada y requiere de otro tipo de estrategia para la recuperación del recurso impactado como la biorremediación. (Infante, C. 1998)



**Figura 9:** Resistividad por medio del método de dipolo - dipolo en el punto 2.



**Figura 10:** Resistividad por el arreglo Schlumberger en el punto 2.

## 5. CONCLUSIÓN

Por medio de las mediciones realizadas en la zona de estudio y de la interpretación de dichos datos se puede concluir que:

El suelo estudiado, a pesar de estar en una zona de alto riesgo a ser contaminada por hidrocarburos, no muestra evidencia eléctrica de plumas contaminantes. Los estudios realizados no fueron concluyentes en este aspecto y se requiere de un estudio más específico y con otros métodos, como, por ejemplo, análisis geoquímico o hidroquímico, para determinar si existe contaminación por hidrocarburos en el subsuelo del sector.

En la zona estudiada la napa subterránea está cerca de la superficie, por lo que esto podría significar que el suelo al contaminarse es autolavado, lo que podría explicar por qué los métodos no arrojan resultados de contaminación.

Si llegase a ocurrir un derrame, en ambos sectores se comportaría de forma similar. Según la resistividad que arrojaron los ensayos, al ser bajas, (30 a 200 Ohm metros) este contaminante se propagaría de forma más rápida que si el suelo presentara resistividades altas (sobre 5.000 ohm metros.), ya que este tipo de suelo tiende a absorber el hidrocarburo y hace que el contaminante comience a propagarse hacia el subsuelo.

El suelo presente en la zona de estudio es principalmente arena a orilla de la costa y arenisca más en el interior del continente. La biorremediación aparece como una solución limpia en caso de un derrame, aunque este método aun está en estudio para hacerlo cada vez más eficaz. En caso de necesitar eliminar la contaminación con mayor rapidez, es necesario acudir a otras formas de mitigación: ante un hecho de derrame menor, la mejor forma de mitigación es la extracción del suelo contaminado y posterior lavado para recuperar el recurso natural. No obstante, si ocurriera un derrame de mayor tamaño esta solución no sería tan efectiva debido a que dadas las propiedades del suelo el contaminante escurriría a las capas inferiores del suelo con mayor rapidez, por lo que en este caso una solución que tendría daños secundarios, pero sería la más rápida, es la de vitrificación in-situ que consiste en incinerar el contaminante para eliminarlo del suelo, aunque esto se iría a la atmósfera.

Los métodos utilizados en este proyecto no arrojaron resultados de contaminación debido a que el contaminante no existe o no presenta las características adecuadas.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

En este proyecto participaron diversas personas que facilitaron la labor de la investigación realizada, es por esto que cabe mencionar los agradecimientos correspondientes a Alejandra Muñoz (Profesor Guía) que por medio de TerraData Ltda. colaboró y facilitó el equipo y traslado al lugar de estudio, además de participar en la realización de los ensayos. Se agradece a Robert King, geólogo de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, quien aceptó cumplir con la labor de profesor informante y además aportó parte de sus conocimientos para realizar un proyecto más completo. A Francisca Aravena y Lisandro de la Fuente, estudiantes de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, quienes colaboraron en las mediciones en terreno. A todos ellos muchas gracias por su participación y apoyo en este proyecto.

## 7. REFERENCIAS

- Auge, M.** 2008. Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea, Buenos Aires, Argentina.
- Braga, A.** 2006. Métodos de electroresistividad y polarización inducida aplicados en los estudios de la captura y contaminación de aguas subterráneas, Rio Claro, Brasil.
- Dahlin, T.** 2001. The development of electrical imaging techniques. Computers and Geosciences, 27(9), 1019-1029.
- Infante, C.** 1998. Biorremediación de derrames de hidrocarburos en ambientes naturales. Memorias del IV Congreso Interamericano sobre el Medio Ambiente. Caracas, Venezuela, diciembre de 1997, colección simposio, volumen II. P 325- 328.
- INE,** 2017. Antecedente Censo 2017 readecuado a la División Político Administrativa vigente a diciembre de 2016.
- Landviser,** LL. software Res2Dinv, <http://www.landviser.net/content/res2dinv-2d-geophysical-inversion-software-resistivity-induced-polarization>
- Lopez Blanco, M.E.** 2005. Estudio de contaminación por hidrocarburos Volátiles (BTEX) en un sitio de Derrame de gasolina, Colonia Unidad de Propósito, Managua, Nicaragua.
- López Hidalgo, A.A.** 2004. La Tomografía Geoeléctrica como Herramienta de Diagnóstico Ambiental del Subsuelo.
- Loke, M.H.** 2010. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Course Notes, 156 pp.
- Orellana, E.** 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continúa. Ed. Paraninfo. 2da. Ed. Madrid, España. 579 pp.
- SERNAGEOMIN,** 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago, Chile.