



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

**Facultad de Ingeniería  
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra  
Departamento de Ingeniería Geofísica**

**Estudio de Polarización Inducida y Resistividad  
en el Proyecto La Buena, Malla La Julia, Distrito Minero Melchor  
Ocampo, Zacatecas.**

Presenta:

Cervantes Rico José Luis Francisco y Vargas Hernández Eduardo

Para obtener el título de:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

Director:

Dr. Andrés Tejero Andrade

Ciudad Universitaria, México DF, Abril de 2013.



# Contenido

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>CAPÍTULO I. MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA Y RESISTIVIDAD EN EL DOMINIO DEL TIEMPO .....</b>	<b>1</b>
I.1 CONCEPTOS BÁSICOS. ....	1
<i>I.1.1 Polarización Inducida (PI) y Cargabilidad. ....</i>	<i>1</i>
El método de Polarización Inducida (PI) en Dominio del Tiempo. ....	2
Concepto de Cargabilidad en el Dominio del Tiempo.....	3
<i>I.1.2 Resistividad.....</i>	<i>4</i>
I.2 MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA Y RESISTIVIDAD EN 2D.....	6
<i>I.2.1 Arreglo Polo-Dipolo .....</i>	<i>6</i>
I.3 MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA Y RESISTIVIDAD EN 3D. ....	7
<i>I.3.1 Arreglo Offset Polo – Dipolo. ....</i>	<i>7</i>
I.4 INVERSIÓN DE DATOS 2D DE POLARIZACIÓN INDUCIDA Y RESISTIVIDAD.....	9
1.4. 1 <i>Introducción a la Teoría de Inversión de Datos.....</i>	<i>9</i>
Norma.....	11
Misfit.....	12
Trade-off.....	12
1.4. 2. <i>Inversión 2D de Datos de Polarización inducida y Resistividad .....</i>	<i>13</i>
<b>CAPÍTULO II. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN LA ETAPA DE CAMPO. ....</b>	<b>16</b>
II. 1 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL TRANSMISOR Y RECEPTOR. ....	16
II. 2 ADQUISICIÓN DE DATOS: ACQUIRE Y ANALYZE. ....	18
<i>II.2.1 Acquire.....</i>	<i>18</i>
<i>II.2.2 Analyze .....</i>	<i>20</i>
II. 3 GEOREFERENCIACIÓN: LOCATION MANAGER. ....	21
II. 4 PREPROCESADO EN LA ETAPA DE CAMPO: JAVIP. ....	23
<i>II.4.1 Importar datos de Resistividad y PI .....</i>	<i>23</i>
<i>II.4.2 Cálculo de la resistividad y parámetros de PI .....</i>	<i>24</i>
<i>II.4.3 Explicación de las diferentes secciones de la ventana del software .....</i>	<i>24</i>
II. 5 PSEUDOSECCIONES 2D: PYTHIP Y UBC DCIP2D. ....	29
Archivos C<P y C>P .....	30
II.6 INVERSIÓN 2D EN UBC DCIP2D .....	33
<b>CAPÍTULO III. PROYECTO LA BUENA, MALLA LA JULIA. ....</b>	<b>35</b>
III.1 GENERALIDADES Y MARCO GEOLÓGICO. ....	35
Localización.....	35
Marco Geológico. ....	37
III. 2 ETAPA 1. ....	38
Resumen del estudio: .....	39
Información de la Malla:.....	40
Parámetros del estudio e instrumentación .....	41
Calidad de Datos.....	43
III. 3 ETAPA 2. ....	44
Resumen del estudio: .....	45

Información de la Malla.....	45
Parámetros del estudio e instrumentación .....	46
Calidad de Datos.....	48
III.4 PSEUDOSECCIONES Y MODELOS 2D.....	49
<b>APÉNDICE A. TABLAS DE RESUMEN 2D Y 3D IP, ETAPA 1. ....</b>	<b>56</b>
<b>APÉNDICE B. TABLAS DE RESUMEN 3D IP, ETAPA 2.....</b>	<b>57</b>
<b>APÉNDICE C. MODELOS 2D C&lt;P Y C&gt;P, L900E.....</b>	<b>58</b>
<b>APÉNDICE D. CURVAS DE CONVERGENCIA PARA MODELOS 2D.....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>62</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 1. 1 POLARIZACIÓN. A) DISTRIBUCIÓN DE IONES EN EQUILIBRIO, B) POLARIZACIÓN SIGUIENDO LA APLICACIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO. EL FLUJO DE CORRIENTE RESIDUAL OCURRE COMO LA RELAJACIÓN DE LOS IONES AL EQUILIBRIO DESPUÉS DE REMOVER EL CAMPO ELÉCTRICO (SLATER Y LESMES, 2008).....	1
FIGURA 1. 2 DIAGRAMA DE LA FORMA DE ONDA DEL POTENCIAL ELÉCTRICO MEDIDO AL INYECTAR.....	2
FIGURA 1. 3 CURVA DE DECAIMIENTO MOSTRANDO Y LOS ELEMENTOS PARA DETERMINAR LA CARGABILIDAD (DECEUSTER Y KAUFMANN, 2012). ....	4
FIGURA 1. 4 DISPOSITIVO TETRAELECTRÓDICO PARA LA MEDIDA .....	5
FIGURA 1. 5 MEDIO HETEROGÉNEO .....	5
FIGURA 1. 6 DISPOSITIVO POLO-DIPOLO .....	6
FIGURA 1. 7 MALLA DE 5 LÍNEAS. EL ESPACIAMIENTO ES DE X METROS: EN ROJO, SE TIENEN DOS REMOTOS REM 1 Y REM 2, LA DISTANCIA MÍNIMA SERÁ DE X METROS, Y LA COBERTURA ES PARA UNA LÍNEA DE RX; EN VERDE, EL REM 1, ES DE UNA DISTANCIA MÍNIMA DE 2X, Y LA COBERTURA SERÁ PARA LAS DOS LÍNEAS DE RX DE LA MALLA. ....	9
FIGURA 1. 8 PROBLEMA DIRECTO – PROBLEMA INVERSO.....	10
FIGURA 1. 9 POTENCIALES ASOCIADOS CON EL ESTUDIO .....	13
FIGURA 1. 10 SECCIÓN OBSERVATIONVIEW .....	26
FIGURA 2. 1 MENÚ ACQUIRE .....	18
FIGURA 2. 2 MENÚ SAVE .....	19
FIGURA 2. 3 VENTANA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	20
FIGURA 2. 4 VENTANA DEL ANALYZE CON CURVAS DE DECAIMIENTO PARA 8 DIPOLOS.....	21
FIGURA 2. 5 VENTANA DEL ANALYZE QUE MUESTRA LA SEÑAL REGISTRADA PARA EL CANAL 5 DE UN ARREGLO DE 8 DIPOLOS .....	21
FIGURA 2. 6 VENTANA –ADDGRID .....	23
FIGURA 2. 7 MODO A SEGUIR PARA CREAR UNA BASE DE DATOS, ABRIRLA O IMPORTAR DATOS .....	24
FIGURA 2. 8 A SEGUIR PARA CALCULAR LA CARGABILIDAD, RESISTIVIDAD Y DEMÁS PARÁMETROS .....	24
FIGURA 2. 9 VENTANA DEL PROGRAMA JAVIP .....	25
FIGURA 2. 10 SECCIÓN READINGSVIEW .....	26
FIGURA 2. 12 PESTAÑA DIPOLES .....	27
FIGURA 2. 11 PESTAÑA LABELS .....	27
FIGURA 2. 13 PESTAÑA LOCATIONS.....	28
FIGURA 2. 14 PESTAÑA DECAYS .....	28
FIGURA 2. 15 PESTAÑA DOTS .....	29
FIGURA 2. 16 PYTHIP Y VENTANA UBC.....	30
FIGURA 2. 17 DIAGRAMA DEL FLUJO DE CORRIENTE EN EL PUNTO DE INYECCIÓN 3375N Y LA POLARIDAD DE LOS VALORES Vp/I PARA LAS ZONAS C<P Y C>P.....	31
FIGURA 2. 18 ESQUEMA PARA C<P Y C>P.....	32
FIGURA 2. 19 PROGRAMA UBC DCIP2D Y PSEUDOSECCIÓN DE CARGABILIDAD APARENTE, DATOS C>P. ....	33

FIGURA 3. 2 MAPA REGIONAL DEL PROYECTO LA BUENA MOSTRANDO POBLACIONES Y RUTAS DE ACCESO.....	36
FIGURA 3. 1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO LA BUENA EN EL ESTADO DE ZACATECAS, MÉXICO. ....	36
FIGURA 3. 4 MALLA LA JULIA, ETAPA 1.....	39
FIGURA 3. 5 CURVAS DE DECAIMIENTO DE LA LÍNEA 700E, ESTACIÓN DE CORRIENTE 2650N, 2DIP ETAPA 1 .....	43
FIGURA 3. 6 CURVAS DE DECAIMIENTO DE LA LÍNEA DE POTENCIAL 1100E, LÍNEA DE CORRIENTE 1300E, ESTACIÓN DE CORRIENTE 2900N, 3DIP ETAPA 1.....	43
FIGURA 3. 7 MALLA LA JULIA, ETAPA.....	44
FIGURA 3. 8 CURVAS DE DECAIMIENTO DE LA LÍNEA DE POTENCIAL 2700N, LÍNEA DE CORRIENTE 2800N, ESTACIÓN DE CORRIENTE 9250E, 3DIP ETAPA 2 .....	48

## Índice de Tablas

TABLA 1 FICHA TÉCNICA DE CADA UNO DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS:.....	17
TABLA 2 DATOS PARA LA ESTACIÓN DE CORRIENTE 3375N. ....	31
TABLA 3 RESUMEN DE LA ETAPA 1, PROYECTO LA BUENA, MALLA LA JULIA.....	40
TABLA 4 PARÁMETROS DE LA MALLA, ETAPA 1.....	41
TABLA 5 PARÁMETROS DE LOS INSTRUMENTOS.....	42
TABLA 6 RESUMEN DE LA ETAPA 1, PROYECTO <i>LA BUENA</i> , MALLA <i>LA JULIA</i> .....	45
TABLA 7 PARÁMETROS DE LA MALLA, ETAPA 2.....	46
TABLA 8 PARÁMETROS DE LOS INSTRUMENTOS.....	47

## **Resumen**

Los métodos de Polarización Inducida (IP) y Resistividad aplicados a la exploración minera proveen resultados significativos en la detección directa de zonas mineralizadas (sulfuros diseminados), así como definir la geometría y estructuras del objetivo de interés. Actualmente, la adquisición de datos no se restringe a los arreglos en línea debido a los avances tecnológicos en la instrumentación de campo y los sistemas de cómputo disponibles para procesar mayor cantidad de datos, y ejecutar algoritmos complicados como la inversión 3D. SJ Geophysics utiliza el arreglo modificado offset Polo – Dipolo con dipolos en línea y ortogonales para la adquisición 3D, registrando significativamente mayor cantidad de datos que el arreglo convencional 2D.

Este reporte describe los procedimientos de SJ Geophysics para adquisición de datos, pre-procesamiento (control de calidad) y el inicio del procesamiento final (inversión) de la etapa de campo del estudio realizado en la zona La Julia del proyecto La Buena de San Marco Resources Inc. en el estado de Zacatecas. El estudio geofísico se realizó en dos fechas diferentes: la primera etapa consistió en un estudio de IP en 2D seguido de una prueba en 3D cubriendo una malla de 6 líneas orientadas de Norte a Sur. Las líneas estaban separadas 200m una de otra y su longitud fue variable, de 1000 a 1600 metros. Se usaron dipolos de potencial de 50m y 100m para el estudio 2D y 3D, respectivamente. En la segunda etapa una pequeña malla 3D (9 líneas) sobre la zona estudiada en la primera etapa se volvió estudiar, sin embargo las líneas se re-orientaron de Este a Oeste. La malla fue configurada con un espaciamiento entre líneas de 100m, la longitud de estas fue de 1600m, mientras que los dipolos de potencial fueron de 50m.

Se seleccionaron las líneas más representativas en ambas etapas para propósitos ilustrativos en este reporte. Los valores de cargabilidad aparente y resistividad aparente se presentan como pseudosecciones, las cuales se utilizan estrictamente para control de calidad de los datos y no para interpretación. Los datos fueron invertidos con los códigos de inversión de la UBC Geophysical Inversion Facility para proporcionar una representación más precisa de las zonas mineralizadas. Tanto inversiones 2D y 3D se realizaron para el proyecto, aunque solo algunos de los resultados 2D se presentan dentro de este reporte.

## **Abstract**

Induced Polarization (IP) and Resistivity methods applied to mineral exploration provide meaningful results in the direct detection of mineralized zones (disseminated sulphides), as well as the delineation of the geometry/structure of a feature of interest. Today, data acquisition is not restricted to collinear arrays due to technological advances with both the field instrumentation and the advanced computing systems available to manage significantly more data and allow the execution of complex algorithms such as 3D inversions. SJ Geophysics utilizes a modified offset Pole-Dipole array configuration with inline and orthogonal dipoles to acquire 3D data, recording significantly more data than a conventional 2D array.

This report describes SJ Geophysics' data acquisition procedures, pre-processing (quality control) and initial back-end processing (inversions) on the La Julia zone field project conducted on San Marco Resources Inc.'s La Buena project in Zacatecas state. The geophysical survey was acquired at two different periods: the first stage consisted of a 2DIP survey followed by a 3DIP test survey covering 6 grid lines oriented from North to South. The grid lines were spaced 200m apart and were of variable lengths from 1000 to 1600 meters. Potential dipoles of 50m and 100m were used for the 2D and 3D surveys, respectively. The second stage consisted of a small 3DIP (9 lines) survey covering the same ground as the previous survey; however, the lines were re-orientated East – West. The grid was configured with a line spacing of 100m, 1600m line length, while acquiring data using 50m potential dipoles.

The most representative lines were selected from both stages for illustration purposes. The apparent chargeability and apparent resistivity values are presented as pseudosections, which are utilized strictly for quality control and not for interpretation. The data was inverted with UBC Geophysical Inversion Facility inversion codes to provide a more accurate sub-surface representation of the mineralized features. Both 2D and 3D inversion were completed for the project, although only the 2D inverted results are represented within the scope of this report.

# Capítulo I. Método de Polarización Inducida y Resistividad en el dominio del tiempo

## I.1 Conceptos Básicos.

### I.1.1 Polarización Inducida (PI) y Cargabilidad.

La polarización inducida (PI) es un fenómeno eléctrico observado como la respuesta al retraso del voltaje en los materiales de la Tierra provocado por una estimulación de corriente eléctrica.

Stater y Lesmes (2009) establecen que tanto los minerales metálicos como los minerales arcillosos pueden provocar anomalías de PI. Estos fenómenos, a nivel microscópico, se denominan polarización electrónica: un metal y un fluido, y polarización de membrana: un no metal (sílice o minerales arcillosos) y un fluido. El primer fenómeno es generalmente más fuerte en amplitud y el más importante para la exploración minera. Sin embargo, el segundo fenómeno también puede ser utilizado para la detección de alteraciones a menudo asociadas con algunos tipos de depósitos (p.e. el fenómeno de Argilización en depósitos epitermales). La polarización resulta en una redistribución de iones a lo largo de la superficie al aplicar corriente eléctrica (Fig. 1.1). Al término de la corriente, los iones tienden a volver al equilibrio, lo cual es equivalente al flujo de corriente residual (análogo a la descarga de un capacitor) y es la fuente de la PI en el subsuelo.

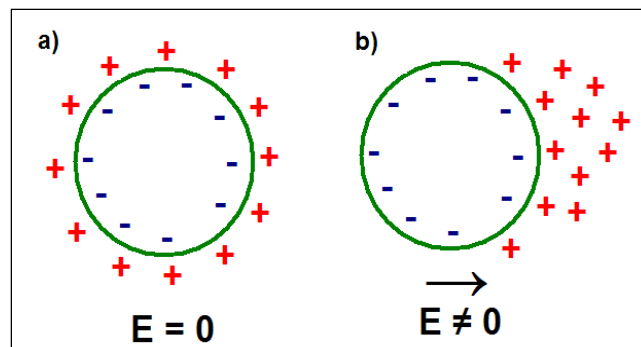
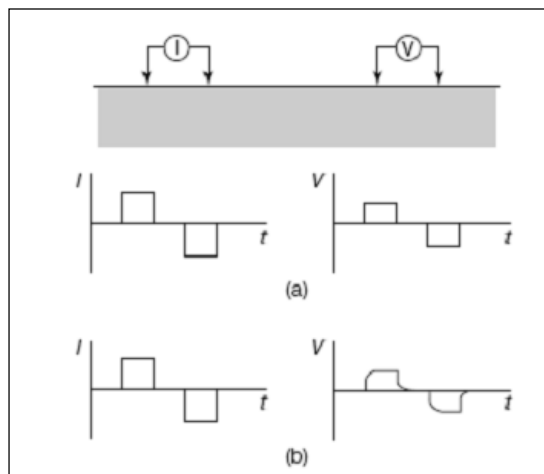


Figura 1. 1 Polarización. a) Distribución de iones en equilibrio, b) Polarización siguiendo la aplicación de un campo eléctrico. El flujo de corriente residual ocurre como la relajación de los iones al equilibrio después de remover el campo eléctrico (Slater y Lesmes, 2008)

**El método de Polarización Inducida (PI) en Dominio del Tiempo.**

Es uno de los métodos geofísicos mas recurridos para la exploración de depósitos de minerales metálicos cuando estos se encuentran diseminados. Existen dos posibles formas de medir el efecto de PI, la primera es con una curva de decaimiento de voltaje (en el dominio del tiempo), la segunda es como la diferencia de voltaje con la variación de la frecuencia (dominio de la frecuencia). En cualquiera de estos casos diferentes configuraciones de electrodos (polo-dipolo, dipolo-dipolo, polo-polo, etc.) permiten ajustar el método a las características de los objetivos de exploración, los rasgos geológicos y la topografía.



**Figura 1. 2 Diagrama de la forma de onda del potencial eléctrico medido al inyectar corriente eléctrica en medios no polarizables (a), y polarizables (b) (Zhdanov, 2009)**

Zhdanov (2009), menciona que el proceso de PI puede ser considerado análogamente a cargar y descargar un capacitor, lo que conduce a que el campo eléctrico en la Tierra tenga un comportamiento que varía con el tiempo y si la frecuencia es demasiado baja se puede decir que la variación del campo magnético respecto al tiempo es cero es decir que no existe el fenómeno de inducción magnética el comportamiento puede ser descrito adecuadamente con la teoría de corriente directa (DC). Usualmente, el proceso de PI es asociado a los efectos de cargar y descargar el suelo inyectando corriente eléctrica. La figura 1.2 muestra esquemáticamente el efecto típico de PI. Al inyectar corriente en el suelo y medir la diferencia de potencial entre dos electrodos, en ausencia del efecto de PI si el suelo es no polarizable, el potencial medido presentara una variación exactamente igual a la forma de onda de la corriente eléctrica de la fuente (Transmisor), sin ningún retraso (decaimiento o incremento) en el potencial. En el caso contrario, cuando el suelo es polarizable, el potencial se incrementará y después decaerá con cierto tiempo de retraso.



### Concepto de Cargabilidad en el Dominio del Tiempo

En el dominio del tiempo la Cargabilidad es definida como el cociente del voltaje después de interrumpir la corriente ( $V_S$ ) entre el máximo valor de voltaje ( $V_P$ ) (Zhanov, 2009; van Schoor et al, 2009):

$$m(t) = \frac{V_S}{V_P} \quad (1)$$

un cociente adimensional que se conoce como *cargabilidad inmediata*. O bien, como la integral de la curva de decaimiento del potencial del  $V_P$  al ser interrumpida la corriente:

$$M(t) = \frac{1}{V_P} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (2)$$

a esta definición se le llama la *cargabilidad global*. Debido a que es demasiado complicado calcular  $V_S$  en la práctica se utiliza la integral (2) normalizada (van Schoor et al, 2009):

$$M(t) = \frac{1}{(t_2 - t_1)V_P} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (3)$$

El término cargabilidad global de la ecuación (2) tiene unidades de milisegundos (ms), pero cuando se define por la ecuación (3), sí la cargabilidad se multiplica por  $10^{-3}$  las unidades son mV/V y se le conoce como *cargabilidad global normalizada*. La ventana de tiempo se selecciona subjetivamente a lo largo de la curva de decaimiento del voltaje. La figura 1.3 muestra un esquema para la curva de decaimiento donde  $V_0$  es el potencial instantáneo cuando la corriente es inyectada,  $V_P$  es el voltaje primario, y  $V_S$  es el voltaje secundario.  $t_1$  es el tiempo de retraso entre el muestreo del decaimiento de PI y cuando la corriente se detiene.  $t_{Mi}$  define el ancho de las ventanas de tiempo utilizadas para determinar la Cargabilidad.

En el caso de los programas de SJ Geophysics Ltd. el numero de ventanas utilizadas es de 20 y el ancho de estas es de: 36, 39, 42, 45, 52, 56, 60, 65, 70, 75, 81, 87, 84, 101, 109, 118, 128, 140, 154. El retraso,  $t_0 = 200$ ms, de 200 a 1800 ms.

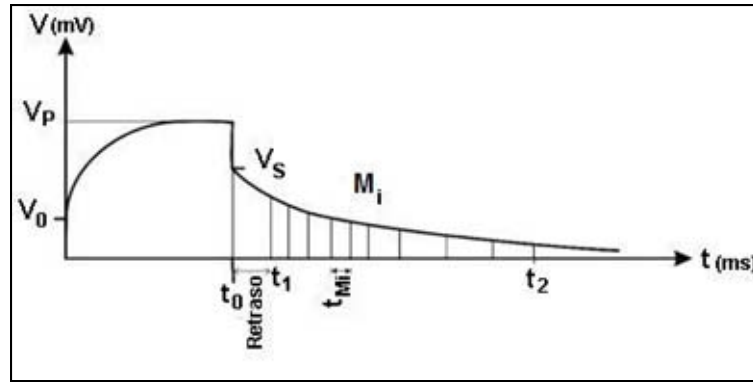


Figura 1. 3 Curva de decaimiento mostrando y los elementos para determinar la Cargabilidad (Deceuster y Kaufmann, 2012).

### I.1.2 Resistividad

La resistividad eléctrica  $\rho$  de un material describe la dificultad que encuentra una corriente eléctrica a su paso a través de dicho cuerpo. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo se encuentra determinada por la resistividad del material y la geometría del conductor. Así que si pasamos una corriente eléctrica de  $I$  amperios por un objeto y la potencia se reduce  $V$  voltios la resistencia  $R$  del objeto se calcula por la ley de Ohm.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

La resistividad eléctrica de la materia se puede calcular:

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

Aquí medimos la resistividad eléctrica para medir la corriente  $I$  y la diferencia del potencial  $V$  donde  $g$  es el factor geométrico que depende de la forma del objeto y la disposición de los electrodos utilizados para pasar la corriente y medir el voltaje. En la superficie de la tierra el "objeto" es un plano infinito donde se pueden utilizar diversas configuraciones con los electrodos.

La figura 1.4 muestra el principio de medida de la resistividad del suelo: se inyecta una corriente  $I$  entre el par de electrodos  $AB$  y se mide la tensión  $\Delta V$  entre el par de electrodos  $MN$ . Si el medio es homogéneo de resistividad  $\rho$ , la diferencia de tensión es (Orellana, 1982)

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (6)$$

Donde AM, AN, BM y BN son las distancias entre electrodos y

$$g = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (7)$$

Es el factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos.

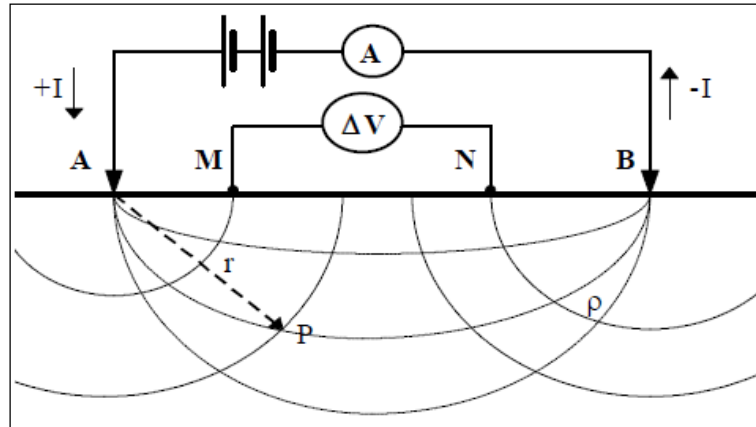


Figura 1. 4 Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad del suelo (Orrellana, 1982)

Al tener un medio heterogéneo como en la vida real (Figura 1.5) y realizar las mediciones para obtener la intensidad de la corriente inyectada por los electrodos A y B, y medir los potenciales inducidos entre los electrodos M y N aplicando la fórmula 6 obtendremos una resistividad aparente ( $\rho_a$ ) que no será exactamente igual a la resistividad  $\rho_1$  verdadera de la zona del electrodo A, ni la resistividad  $\rho_2$  bajo los electrodos M, N, B, si no que dependerá de  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $\rho_3$ . Esta resistividad no puede considerarse como el promedio o como medida ponderada de las tres resistividades, pudiendo ocurrir que fuese mayor o menor que cualquiera de ellas.

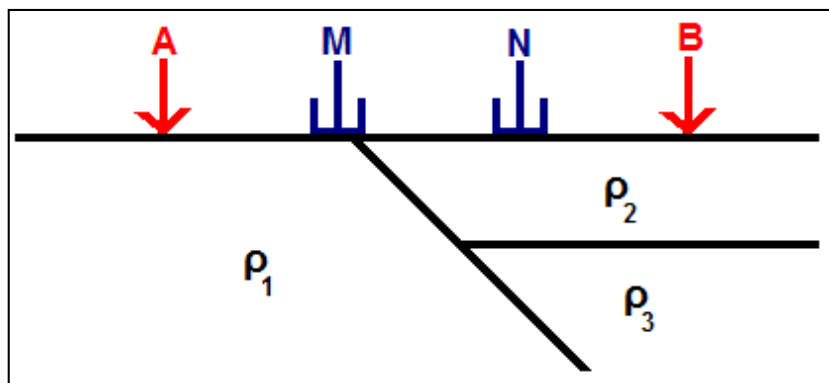


Figura 1. 5 Medio Heterogéneo

La resistividad aparente es la variable básica en todos los estudios geoelectricos, su expresión general tiene la siguiente forma:

$$\rho_a = g \frac{\Delta U}{I} \quad (8)$$

## I.2 Método de Polarización inducida y Resistividad en 2D

Para recolectar datos de polarización inducida y resistividad en 2D SJ Geophysics utiliza un arreglo con dipolos de potencial a lo largo de la línea a prospectar, sobre esta misma línea se fijan estaciones para los electrodos de corriente, todo el trabajo se realiza en la línea, avanzando el arreglo dipolar y las estaciones de corriente dependiendo del tipo de arreglo que se utilice.

Se tiene que tener cuidado de separar los alambres de corriente de los cables de potencial ya que si se llegasen a tocar mientras se están registrando los voltajes, estos tendrán mayor contenido de ruido y el efecto electromagnético será mayor y se reflejará en las curvas de decaimiento.

Al inyectar la corriente eléctrica al subsuelo se asume que esta fluye en línea recta entre los dos electrodos de corriente y por ende entre los electrodos de potencial, de esta manera nuestros datos adquiridos provienen justo debajo de la línea que estamos prospectando. Así decimos que los datos adquiridos en campo provienen justo en línea recta a profundidad sobre nuestra línea de estudio.

### I.2.1 Arreglo Polo-Dipolo

En este dispositivo el electrodo B se lleva a una gran distancia (teóricamente en el infinito)

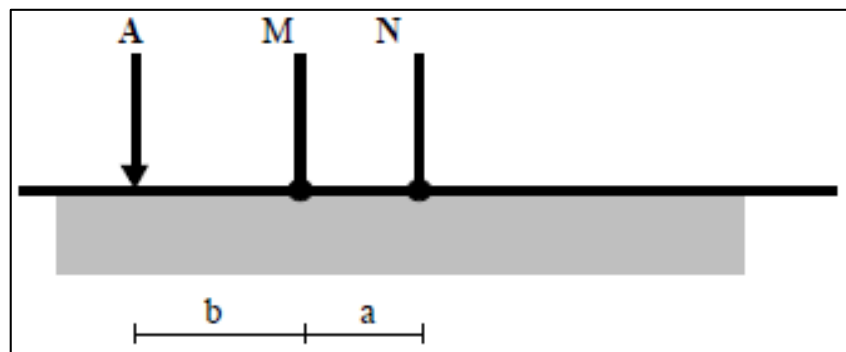


Figura 1. 6 Dispositivo Polo-Dipolo

El factor geométrico del dispositivo en este caso es:

$$g = 2\pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (9)$$

Cuando  $a \ll b$  este dispositivo es equivalente al semi-Schlumberger. Una variación del dispositivo polo-dipolo se obtiene moviendo uno de los electrodos de potencial, por ejemplo N, a un punto distante (teóricamente al infinito). En este caso el factor geométrico es:

$$g = 2\pi b \quad (10)$$

Que coincide con la expresión del dispositivo Wenner, por lo que también recibe el nombre de dispositivo half-Wenner (Telford et al, 1990).

### **I.3 Método de Polarización Inducida y Resistividad en 3D.**

El desarrollo de programas capaces de resolver algoritmos de inversión cada vez más complejos ha sido posible gracias a la tecnología más eficiente en cuestión de cómputo. Actualmente los procesos de inversión en 3D no requieren de una configuración de electrodos colineales. Ahora los arreglos de electrodos se pueden diseñar para optimizar la definición del objetivo y la eficiencia en la recolección de datos.

Al inyectar corriente eléctrica en el subsuelo, ésta no fluye en una línea recta como se asume en los métodos 2D, las trayectorias por donde fluye la corriente eléctrica son más bien circulares o esféricas y en realidad parte de la información registrada por el receptor proviene de fuera de la línea. La trayectoria de la corriente a través del subsuelo hacia los dipolos de potencial tiene un gran efecto en el resultado. Los métodos de adquisición 3D consideran trayectorias no en línea recta, por lo que la información adquirida en campo se acerca más a la realidad.

#### **I.3.1 Arreglo Offset Polo – Dipolo.**

White et al (2001) describen la configuración electródica para un nuevo diseño de adquisición de datos, modificando el arreglo convencional Polo – Dipolo. Este nuevo arreglo consiste en colocar dos líneas de potencial o receptor, paralelas, separadas 400 metros entre sí, y una línea de potencial entre éstas dos la cual es la línea de transmisión. Las líneas de receptor registran todos los dipolos simultáneamente mientras la línea de transmisión inyecta corriente en cada una de las estaciones. A este arreglo se le denomina Offset Polo – Dipolo.

El arreglo Offset polo – dipolo ofrece la posibilidad de recolectar una gran cantidad de datos de manera eficiente y tiene una mayor sensibilidad de inversión, así como mayor profundidad de investigación que los arreglos convencionales. Además, este arreglo ofrece la ventaja de disminuir el acoplamiento electromagnético (EM), al estar separados los cables de transmisión y receptor, el cual se puede convertir en un problema en los primeros tiempos de decaimiento en áreas donde la resistividad de la superficie esta por debajo de los 10  $\Omega \cdot m$ . Al registrar un punto de inyección de corriente paralelo a un electrodo de potencial se observa un fenómeno conocido como No-Acoplamiento o acoplamiento nulo, este no-acoplamiento aparece como un cambio en la polaridad de los voltajes primarios ( $V_p$ ).

El método de 3DIP de SJ Geophysics Ltd. consiste en dos líneas de transmisión o corriente (Tx) y una línea de potencial o receptor (Rx) entre estas dos líneas de Tx, registrando cada estación de corriente (offset Polo – dipolo modificado). Un conjunto de electrodos, dos o tres, se utilizan como el punto de inyección móvil o polo de corriente a lo largo de cada línea de Tx. Esta modalidad tiene gran ventaja en cuanto a logística, ya que mientras una estación de corriente de la primera línea de Tx es registrada, el polo de corriente de la segunda línea de Tx avanza a la siguiente estación, y en buenas condiciones de trabajo, el receptor no deja de registrar, optimizando el tiempo.

Para una malla de 3DIP se requiere un número impar de líneas, equiespaciadas dependiendo el objetivo. En exploración minera, usualmente se utiliza espaciamiento entre líneas de 100 o 200 metros y la longitud de los dipolos de potencial es la mitad de dicho espaciamiento, es decir, que para un espaciamiento entre líneas de 100m, los dipolos de potencial serán de 50m, y de 100m para un espaciamiento entre líneas de 200m. El “remoto” es un conjunto de electrodos, tres o cuatro, dependiendo de la resistividad del terreno, los cuales se colocan en ambos lados fuera de la malla para cerrar el circuito eléctrico. La misma regla del segundo polo de corriente hacia el infinito es aplicable para el arreglo Offset polo – dipolo, por cuestiones de logística, y la topografía, su posición espacial dependerá de cuantas líneas se quiera cubrir, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Por facilidad, el remoto deberá cubrir un número impar de líneas;
- El remoto será colíneal a la línea central del conjunto de líneas que se planea cubrir;
- La distancia mínima para colocar un remoto fuera de la malla esta dado por la siguiente

relación:

$$\text{Distancia}_{\text{mínima}} = \# \text{ de líneas a cubrir} * \text{Espaciamiento entre líneas}$$

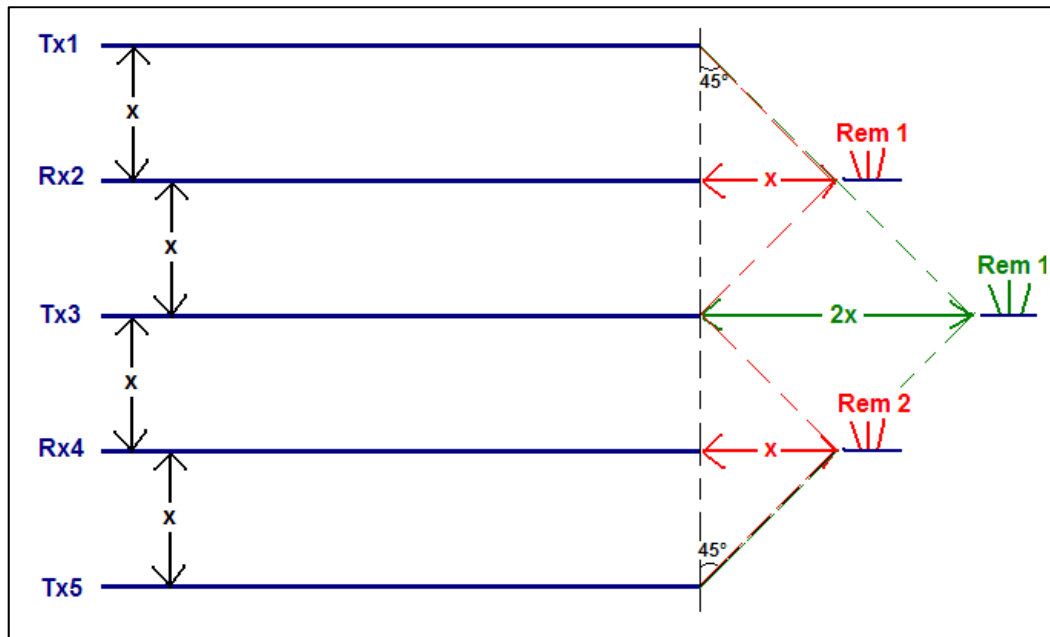


Figura 1. 7 Malla de 5 líneas. El espaciamiento es de  $x$  metros: en rojo, se tienen dos remotos Rem 1 y Rem 2, la distancia mínima será de  $x$  metros, y la cobertura es para una línea de Rx; en verde, el Rem 1, es de una distancia mínima de  $2x$ , y la cobertura será para las dos líneas de Rx de la malla.

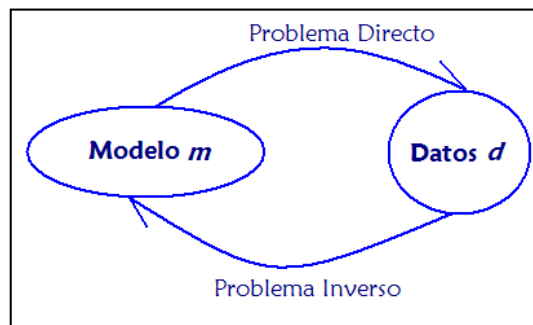
En la figura 1.7, se tiene un bosquejo de una malla de cinco líneas, tres de corriente (Tx) y dos de potencial (Rx), y dos casos para colocar el remoto en un solo lado de la malla. Si se planea cubrir una línea de potencial a la vez la malla tendrá dos remotos (en rojo) y si se planea cubrir las dos líneas de potencial la malla solo tendrá un remoto (en verde). Se observa que una línea imaginaria que corta las últimas estaciones de las líneas, formando un ángulo de  $45^\circ$  con otra línea imaginaria que va de la última estación de la última línea que se planea cubrir y el remoto: si el ángulo entre estas líneas es menor a  $45^\circ$ , la zona de no acoplamiento afectará a más dipolos de potencial en este extremo de la línea.

## 1.4 Inversión de Datos 2D de Polarización inducida y Resistividad

### 1.4.1 Introducción a la Teoría de Inversión de Datos.

Una de las tareas del geofísico es hacer declaraciones cuantitativas del interior de la Tierra. Por esta razón una importante área en la investigación geofísica y aplicada son los problemas inversos. La figura 1.8 muestra la manera en que muchos textos presentan el problema inverso de datos geofísicos. Scales y Snider (2000) explican que el modelo de la Tierra es un elemento de un espacio matemático que contiene parametrizaciones aceptables de las propiedades de la Tierra o al menos, propiedades dadas por cierto estudio geofísico; este espacio es referido

como el *espacio del modelo*. La física del problema determina cual dato  $d$  corresponde al modelo dado  $m$ . El problema de calcular la respuesta del modelo (datos sintéticos) dando un modelo es llamado *problema directo*. Los datos correspondientes que están en el espacio matemático son llamado *espacio de datos*. En muchas aplicaciones geofísicas, uno recoge los datos, y el objetivo es encontrar el modelo correspondiente. Esta tarea es llamada *problema inverso*, como se muestra en la figura 1.8.



**Figura 1. 8 Problema Directo – Problema Inverso (Scales y Snieder, 2000).**

El espacio de datos siempre es de dimensión finita porque cualquier experimento arroja solo un número finito de mediciones o datos. Una cuenta simple de variables muestra que el mapeo desde los datos hacia un modelo no es único, debe haber elementos en el modelo que no tengan influencia en los datos. Esta carencia de unicidad es aparente incluso en problemas idealizados libres de ruido, ya que diferentes modelos se ajustan a los datos observados. La importancia práctica de la no-unicidad requiere observar el problema directamente, incluyendo información disponible (a priori) e inclusive, considerar quien es el usuario final del modelo y para que lo va a utilizar.

El problema directo involucra el cálculo de respuestas asumiendo que las fuentes y el modelo de la Tierra se conocen. Oldenburg y Li (2005) definen que los datos de un estudio geofísico se pueden escribir de manera general como:

$$F_j[m] = d_j + n_j \quad \text{para } j = 1, \dots, N \quad (11)$$

donde  $F$  es el operador del modelado directo el cual, por lo general es una integral o un operador diferencial que incorpora los detalles del estudio y las ecuaciones físicas relevantes,  $m$  es un símbolo genérico para la distribución de cierta propiedad física, y la parte del lado derecho de la ecuación representa los datos observados  $d^{obs}$  los cuales son los datos reales  $d$  más su contenido de ruido  $n$ .



En un problema inverso típico se proveen las observaciones o datos y algunas de sus incertidumbres, como sería el caso del contenido de ruido y/o el error en la posición espacial de los datos. Los problemas inversos en geofísica pueden ser lineales o no lineales. Los problemas lineales conservan el principio de superposición y son relativamente sencillos de resolver, mientras que para los problemas no lineales la manera más fácil de resolverlos es linealizando las ecuaciones e iterar.

Para resolver problemas inversos lineales en su forma más sencilla, Menke (1989) utiliza y describe los mínimos cuadrados para resolver este tipo de problema inverso. Calculando la derivada del error  $E$  con respecto a uno de los parámetros del modelo,  $m_q$  y igualando el resultado a cero:

$$E = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (12)$$
$$\frac{\partial E}{\partial m_q} = 2 \sum_k^M m_k \sum_i^N G_{iq} G_{ik} - 2 \sum_i^N G_{iq} d_i \quad (13)$$

En notación matricial:

$$\mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{m} - \mathbf{G}^T \mathbf{d} = 0 \quad (14)$$

Donde  $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$  es una matriz cuadrada  $M \times M$  y,  $\mathbf{m}$  y  $\mathbf{G}^T \mathbf{d}$  son vectores de longitud  $M$ .

Sí  $[\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1}$  existe, entonces:

$$\mathbf{m}^{\text{est}} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (15)$$

La ecuación (15) es la solución por mínimos cuadrados del problema inverso  $\mathbf{Gm}=\mathbf{d}$ , donde  $\mathbf{m}$  son los parámetros del modelo,  $\mathbf{d}$  son los datos y  $\mathbf{G}$  es el kernel de datos.

Algunos parámetros que rigen la inversión de datos.

### **Norma**

Este parámetro se usa para calcular la diferencia entre dos elementos, y es importante porque se requiere encontrar un modelo en el cual los datos sintéticos o predichos sean lo más semejantes posible a los datos observados, la norma ayuda a encontrar esa diferencia mínima. Debido a que la diferencia entre los datos predichos y observados no es constante para todo el modelo se requiere una norma que pueda acercarse lo más posible a todos los datos dependiendo si el problema es lineal o no lineal. Una consideración para diseñar una norma es que esta es la manera en la que información a priori será incluida en el modelo, por ejemplo: sí

se conocen valores de cargabilidad o resistividad de algún barreno, estos pueden ser tomados como valores de referencia. Sí consideramos un modelo  $M$ , con  $\mathbf{m} = (m_1, m_2, \dots, m_M)$  y el tamaño de  $\mathbf{m}$  es  $\varphi_m$ , se puede escribir como:

$$\varphi_m = \mathbf{W} \mathbf{m}^2 \quad (16)$$

donde  $\mathbf{W}$  es una matriz de peso  $N \times N$  y la notación vectorial denota la norma del vector  $\mathbf{m}$ , lo que significa una medida en el tamaño del vector.

### **Misfit**

Este parámetro se refiere a la diferencia entre los datos observados y los datos predichos. Sí estas dos cantidades son suficientemente cercanas, entonces se considera que el modelo es viable para resolver el problema. Ya que los datos observados tienen cierto error o ruido, el objetivo entonces será encontrar aquellos modelos en los que los datos predichos sean consistentes con los errores en las observaciones.

Teniendo en cuenta una aproximación estándar (estadísticamente), y cada conjunto de datos,  $d_i$ , contienen error (o ruido) se puede describir con distribución Gaussiana y desviación estándar  $\varepsilon_i$ , el misfit entre las predicciones y los datos de campo es:

$$\varphi_d(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{d_i^{obs} - d_i^{pred}}{\varepsilon_i} \right)^2 \quad (17)$$

Los datos predichos serán considerados como aceptables cuando el valor de  $\varphi_d$  sea menor que cierta tolerancia predeterminada. Sí en la ecuación (17) la diferencia del numerador es en promedio  $\varepsilon_i$ , resultará en el número de datos,  $N$ . Es decir que una tolerancia correcta será que:

$$\Phi_d = N \quad (18)$$

Al considerar esta tolerancia, se puede esperar un misfit resultante, el cual se llamará target misfit ( $\varphi_d^*$ ) y sirve para restringir la inversión a que llegue a ese valor esperado, por lo que  $\varphi_d \approx \varphi_d^*$ .

### **Trade-off**

El trade-off es la forma de minimizar la norma y el misfit al combinarlos: haciendo el misfit lo más pequeño que se pueda y reduciendo el valor de la norma del modelo. Se conoce como el

parámetro de regularización o de Tikhonov,  $\beta$ . De esta manera, queremos encontrar un modelo  $m$  que minimice  $\varphi_m(m)$  dado que  $\varphi_d \approx \varphi_d^*$ .

$$\varphi = \varphi_d + \beta\varphi_m \text{ para } 0 < \beta < \infty \quad (19)$$

#### 1. 4. 2. Inversión 2D de Datos de Polarización inducida y Resistividad

El problema inverso para datos de resistividad y polarización inducida es no lineal, ya que las cargas eléctricas acumuladas en las regiones donde la conductividad está cambiando, tienen campos que afectan a la magnitud de la acumulación de carga en otras áreas. Matemáticamente, esto es que el operador en el modelado directo involucra el producto del modelo  $\sigma$  (conductividad eléctrica), con el gradiente de la respuesta  $\varphi_\sigma$  (potencial eléctrico):

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi_\sigma) = -I\delta(r - r_s) \quad (20)$$

donde  $r_s$  es la posición del electrodo de corriente.

La ecuación diferencial de resistividad (20), implica que el principio de superposición con respecto a las conductividades no es válido.

Oldenburg y Li, en 1994, definen tres metodologías para obtener modelos de cargabilidad a partir de invertir datos de potencial eléctrico obtienen el modelo de conductividades y, siguiendo el modelo de Siegel (donde la cargabilidad esta ligada a la conductividad) se invierte la cargabilidad. El primer método es linealizando la ecuación de los datos de cargabilidad, el segundo método implica definir un operador de mapeo inverso, y finalmente, en el tercer método realizan una inversión no lineal. En la práctica la manera más sencilla de obtener un modelo de cargabilidades es por el primer método.

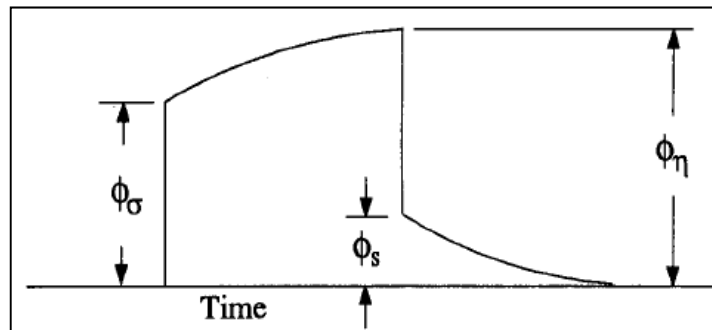


Figura 1. 9 Potenciales asociados con el estudio de PI (Oldenburg y Li, 1994).

En la metodología, la ecuación (20) es el operador de mapeo directo  $F_{DC}$  y si el medio es polarizable el potencial  $\varphi_\eta$  en la figura 1.6 será diferente del potencial  $\varphi_\sigma$ , y la relación entre la cargabilidad y la conductividad está dado por:

$$\sigma = \sigma(1 - \eta) \quad (21)$$

Entonces el potencial  $\varphi_\eta$  está dado por:

$$\varphi_\eta = F_{DC}[\sigma(1 - \eta)] \quad (22)$$

o bien, como:

$$\nabla \cdot (\sigma(1 - \eta) \nabla \varphi_\eta) = -I\delta(r - r_s) \quad (23)$$

el espacio de datos de PI, el cual se refiere la cargabilidad aparente se define como:

$$\eta_a = \frac{\varphi_s}{\varphi_\eta} = \frac{\varphi_\eta - \varphi_\sigma}{\varphi_\eta} \quad (24)$$

o, como:

$$\eta_a = \frac{F_{DC}[\sigma(1 - \eta)] - F_{DC}[\sigma]}{F_{DC}[\sigma(1 - \eta)]} \quad (25)$$

La ecuación (25) define el mapeo directo de los datos de PI y muestra que la cargabilidad aparente se puede calcular llevando a cabo dos modelados directos de resistividad con las conductividades  $\sigma$  y  $\sigma(1 - \eta)$ .

Ahora bien, en este caso la función objetivo  $\psi_m$  a minimizar esta dada por:

$$\psi_m(m) = \psi_m(m, m_0) + \mu(\psi_d(d, d_0) - \psi_d^*) \quad (26)$$

para la norma definida por la ecuación (26), dado que el misfit sea igual al target misfit en la ecuación (27):

$$\psi_m(m, m_0) = \|W_m(m - m_0)\|^2 \quad (27)$$

$$\psi_d(d, d_0) = \|W_m(d - d_0)\|^2 = \psi_d^* \quad (28)$$

$m_0$  es el modelo base o de referencia y  $W_m = \text{diag}\{1/\epsilon_1, \dots, 1/\epsilon_N\}$  es la matriz de peso  $N \times N$ ,  $\psi_d$  es una variable aleatoria con distribución chi cuadrada con  $N$  grados de libertad y  $\mu$  es un multiplicador de Lagrange en la ecuación (26). De esta manera el problema es no lineal y se aborda linealizando la ecuación (26) respecto al modelo  $m$ . El desarrollo completo de la

linealización de la ecuación (26) está descrito por Oldenburg et al (1993), Oldenburg y Li (1994) y (2005), y la función objetivo queda de la siguiente manera:

$$\psi_m(m, m_0) = \alpha_s \iint w_s (m - m_0)^2 dx dz + \iint \left\{ \alpha_x w_x \left( \frac{\partial(m - m_0)}{\partial x} \right) + \alpha_z w_z \left( \frac{\partial(m - m_0)}{\partial z} \right) \right\} dx dz \quad (29)$$

donde las funciones  $w_s$ ,  $w_x$ , y  $w_z$  son especificadas por el usuario y las constantes  $\alpha_s$ ,  $\alpha_x$  y  $\alpha_z$  controlan la cercanía del modelos construido y el modelo base  $m_0$  así como la forma del modelo en las direcciones vertical y horizontal. La forma discreta de la ecuación (29) esta dada por:

$$\psi_m = (m - m_0)^T W_m^T W_m (m - m_0) \quad (30)$$

La función objetivo minimizada  $\psi_m$  se invierte para los potenciales eléctricos por medio de la técnica de sub-espacios (Oldenburg et al, 1993) la cual tiene la ventaja de que solo hay que invertir una matriz de igual dimensión del sub-espacio de datos. Y para invertir los datos de cargabilidad aparente, la metodología asume que la cargabilidad  $\eta \ll 1.0$ , y como se ha descrito arriba, la ecuación (25) se linealiza respecto a la conductividad recuperada de la inversión del potencial eléctrico, en este caso se resuelve un problema lineal inverso para  $\eta$ , en que se considera que la Tierra se divide en  $M$  celdas y  $\eta_i$  y  $\sigma_i$  son los valores de cargabilidad y conductividad de la  $i$ -ésima celda, linealizando el potencial  $\phi_\sigma$  respecto al modelo de conductividad  $\sigma$  nos da una aproximación como:

$$\eta_a = - \sum_j \frac{\sigma_j}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_j} \eta_j = - \sum_j \frac{\partial \ln \phi}{\partial \ln \sigma_j} \eta_j \quad (30)$$

y el  $i$ -ésimo elemento del conjunto de datos es:

$$\eta_{ai} = \sum_{j=1}^M J_{ij} \eta_j \quad \text{para } i = 1, \dots, N \quad (31)$$

Donde la matriz de sensibilidad es  $J_{ij} = - \frac{\partial \ln \phi_i[\sigma]}{\partial \ln \sigma_j}$  y se calcula a partir de la conductividad obtenida de la inversión de resistividad.

En la inversión de potenciales eléctricos se asegura que las conductividades son positivas trabajando con  $m = \ln \sigma$  y de acuerdo con Oldenburg y Li (1994) esta es una elección natural debido a que la conductividad varía en muchos órdenes de magnitud y un cambio relativo en la conductividad es a veces más significativo geológicamente que un cambio absoluto.

## **Capítulo II. Adquisición y Procesamiento de Datos en la Etapa de Campo.**

Durante la etapa de campo la adquisición de datos se realiza por medio de los programas *Acquire* y *Analyze*, una vez que el transmisor inyecta la corriente en el subsuelo *Acquire* activa los digitalizadores en el receptor; una vez terminado el registro *Analyze* se utiliza para calcular las cargabilidades y construir las curvas de decaimiento para cada dipolo. Una vez terminada una línea de potencial, 2D o 3D, se construye una base de datos la cual contiene toda la información registrada en campo ( $V_p$ ,  $M_x$ ,  $S_p$ ), el programa para construir dicha base de datos es *JavIP* el cual también calcula las resistividades aparentes utilizando a su vez otra base de datos de georeferenciación construida con la información espacial de la malla en un programa llamado *Location Manager*. En *JavIP* se lleva el procesado preeliminar en campo, que es el control de calidad de los datos antes de ser enviados a la oficina para su inversión. Una vez que la base de datos en *JavIP* tiene la calidad adecuada se utilizan los programas *Pythip* y *UBC DCIP2D* para construir las pseudosecciones 2D.

Los programas mencionados arriba, excepto *UBC DCIP2D*, han sido desarrollados y son propiedad de *SJ Geophysics Ltd.*, por lo que no se puede describir los algoritmos utilizados. En los apartados siguientes se describen las fichas técnicas del receptor y los transmisores utilizados durante el proyecto *La Buena*, así como los programas utilizados para registrar y procesar los datos.

### **II. 1 Descripción técnica del Transmisor y Receptor.**

El equipo de adquisición de datos utilizado por *SJ Geophysics Ltd.* consta de un transmisor *GDD Tx II IP*, alimentado por un generador a gasolina de 5000W, actualmente los números de serie de los transmisores *GDD* son 303 y 434; para la etapa 1 del proyecto *La Buena*, se utilizó un transmisor de modelo más antiguo con número de serie 246 mientras que para la etapa 2 se utilizó completamente el equipo con número de serie 303. El receptor consta de 4 digitalizadores conectados en serie entre sí y a una computadora para poder operarlos y registrar la información. Cada digitalizador registra 4 canales (un dipolo por cada canal) y es de 24 bits, estos digitalizadores se denominan *SJ-24 Full Waveform* y han sido desarrollados en su totalidad por *SJ Geophysics Ltd.*

A continuación se describe la ficha técnica de cada uno de los instrumentos utilizados:

**Receptor Digital para IP SJ-24 Full Waveform:**

<b>Información técnica:</b>	
Impedancia de entrada:	10 MΩ
Protección de sobrevoltaje de entrada:	Más de 1000V
Memoria Externa:	Lecturas ilimitadas
Número de dipolos:	4 a 16 +, expandible
Sincronización:	Seleccionable por el usuario mediante un software de post-procesado de señales.
Potencia espontáneo (Sp):	Rango:-5V a +5V Resolución: 0.1mV
Voltaje primario (Vp):	Rango: 1μV – 10V (24bit) Resolución: 1μV Precisión: typ. <1.0%
Cargabilidad:	Resolución: 1μV/V Precisión: typ. <1.0%
<b>General (unidad de 4 dipolos):</b>	
Dimensiones:	18x16x9cm
Peso:	1.1kg
Batería:	12V externa.
Rango de temperatura de operación:	-20°C a 40°C

**Transmisores GDD Tx II IP**

Voltaje de entrada:	120V / 60 Hz or 240V / 50Hz (opcional)
Potencia de salida:	3.6 kW máximo.
Voltaje de salida:	150 a 2200 V
Corriente de salida:	5 mA a 10 A
Dominio del tiempo	
Serie 246:	Ciclo de 2 segundos on/off.
Serie 303:	Ciclo de 1, 2, 4, 8 segundos on/off
Rango de temperatura operacional:	-40°a +65° C
Pantalla:	Digital LCD @ 0.001 A
Dimensiones	
Serie 246:	40 x 21 x 50 cm
Serie 303:	34 x 21 x 39 cm
Peso	
Serie 246:	50Kg.
Serie 303:	20 Kg.

Tabla 1 Ficha técnica de cada uno de los instrumentos utilizados:

## II. 2 Adquisición de Datos: Acquire y Analyze.

Los programas utilizados en la etapa de adquisición de datos son dos, Acquire y Analyze, estos son usados directamente en el campo para adquirir y analizar los datos al momento y poder tener una mejor calidad de datos recolectados. Tanto Acquire y Analyze son programas desarrollados por SJ Geophysics Ltd.

### II.2.1 Acquire

Este es el software que se utiliza para recolectar los datos, básicamente lo que hace este programa es sincronizar los digitalizadores y registrar el voltaje en cada dipolo. Consta de cuatro menús como se pueden apreciar en la siguiente Figura.

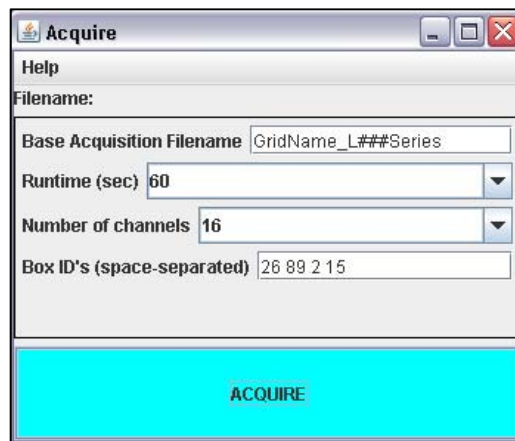


Figura 2. 1 Menú Acquire

- **Base Acquisition Filename:** En esta casilla se escribe el prefijo con el cual quedaran nombrados y guardados los archivos de adquisición. Por lo general se escribe el nombre del proyecto unido por un guión bajo por la línea con la que se está trabajando y la serie de dicha línea (GridName\_L#####Series).

- **Runtime (sec):** En esta casilla se fija el tiempo en segundos con el cual se va a registrar el voltaje de cada dipolo. Tiene diferentes rangos para registrar, usualmente se fija en 60s si las condiciones del terreno son benignas y si el terreno es muy resistivo se puede cambiar el tiempo de lectura a 120s o más

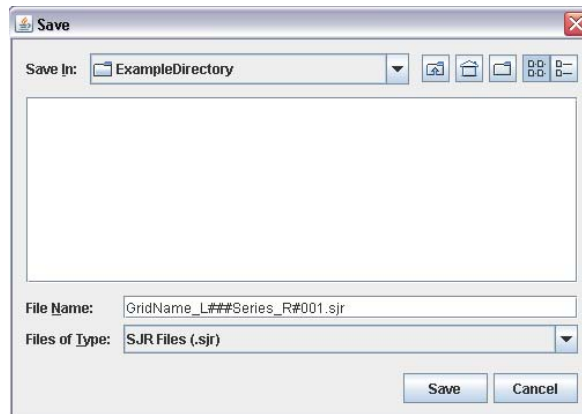
- **Number of channels:** esta casilla corresponde al número de canales que se tendrán en uso a la hora de la lectura, cada canal corresponde a un dipolo del arreglo con el que se esté trabajando en ese momento, normalmente se usan 16 canales.

- **Box ID's (space separated):** En ésta casilla se fijan los números de serie de cada uno de



los digitalizadores separados por un espacio. Como se menciona anteriormente cada digitalizador contiene 4 canales, al tener un arreglo de 16 dipolos se utilizan 4 digitalizadores.

Una vez configuradas las cuatro casillas de la ventana anterior se le da click en el área azul de la ventana (Figura 2.1), automáticamente aparecerá otra venta de nombre "Save" (Figura 2.2), la cual es el menú para seleccionar la carpeta donde serán guardados los archivos de los datos de adquisición.



**Figura 2. 2 Menú Save**

Generalmente el nombre de la carpeta es un subdirectorio del proyecto, este deberá indicar el número de la línea para llevar un orden para después poder construir la base de datos. El nombre del archivo se guardara con el prefijo previamente seleccionado en la casilla "Base Acquisition Filename", el programa asigna automáticamente el número de archivo para cada lectura (GridName\_L#####Series\_R#001.sjr). Al terminar la adquisición para la estación, la numeración de los archivos cambia de forma automática para las lecturas subsecuentes.

Una vez seleccionada la carpeta donde se guardaran los archivos, se le da un click al botón Save de la ventana de mismo nombre (Figura 2.2), aparecerá una ventana donde se indican las configuraciones seleccionadas en el Menú Acquire como encabezado, se sincronizan los digitalizadores y comienza la adquisición de datos, en la ventana se muestran diferentes columnas correspondiendo la primera a el Tiempo y a partir de la segunda columna corresponde a los valores registrados de Voltaje para cada canal en ese tiempo de registro (Figura 2.3)

```

D:\SJVPrograms\Digital_Receiver\Receiver3.6_Python2.6\acquire\acquire.exe
Initializing devices...
Found requested device: 48
Found requested device: 2
Found requested device: 30
Resetting timer...
Synchronizing power...
Starting acquisition...

Filename: C:\Documents and Settings\sjv\
os_L22_a_28Oct\GridName_L####Series_R#002.sjr
Start time on Device 48: 0.004040
Start time on Device 2: 0.006040
Start time on Device 30: 0.007040

TIME CH 1 CH 2 CH 3 CH 4 CH 5 CH 6 CH 7 CH 8 CH 9 CH10 CH11 CH12
0.25 -6 25 -87 54 23 10 1 -18 -7 29 -4 506
0.50 -6 25 -87 54 23 10 1 -18 -7 29 -4 506
0.75 -6 25 -87 54 23 10 1 -18 -7 29 -4 506
1.00 -7 25 -87 54 23 10 1 -18 -7 29 -4 506
1.25 -7 25 -87 54 23 10 1 -18 -7 29 -4 506
1.50 -7 25 -88 54 23 10 1 -18 -7 29 -4 506
1.75 -14 12 -100 57 39 17 5 -11 -3 31 3 509
2.00 -20 4 -109 60 50 22 8 -7 -1 33 9 512

```

Figura 2.3 Ventana de adquisición de datos

## II.2.2 Analyze

Este programa es la parte medular de la adquisición de datos ya que construye las curvas de decaimiento una vez finalizada la adquisición de los voltajes, de esta manera se pueden distinguir los diversos problemas que puedan surgir a lo largo del estudio, ya que la experiencia del operador es de vital importancia para poder tener una recolección de datos de buena calidad y depende de su capacidad para poder leer y analizar en campo, ya que aquí es donde se identifican problemas en las conexiones de los diferentes dipolos, cables, digitalizadores, etc.

Al término de la lectura de adquisición con el programa Acquire se utiliza el Analyze para calcular los valores de cargabilidad (Mx) y construir las curvas de decaimiento para cada dipolo. El programa utiliza un filtro pasa bajas para procesar las señales. Dándole click en el botón “Analyze Most Recent Reading”, el programa carga el ultimo archivo registrado por Acquire, al concluir el proceso del cálculo de cargabilidades y curvas de decaimiento para dicha lectura, Analyze genera un segundo archivo con el mismo nombre de la lectura analizada pero con una extensión distinta (.xml), este archivo es el que se utiliza para construir la base de datos en el programa JavIP.

En la parte izquierda de la ventana del Analyze (Figura 2.4), se muestra un menú con las opciones Mxs, IP\_signal # y IP\_stack #. Mxs muestra la ventana Decay curves en la cual se ven desplegadas las curvas de decaimiento construidas en una grafica Tiempo [s] vs Cargabilidad [mV/V] y un recuadro en la esquina superior derecha con seis columnas que corresponden en el orden de izquierda a derecha a: Número de Dipolo, Valor de Potencial Espontáneo (SP), Valor de Voltaje Primario (Vp), Porcentaje de Error del Voltaje Primario (%Vp), Cargabilidad (Mx) y por ultimo Porcentaje de Error de Cargabilidad (%Mx).

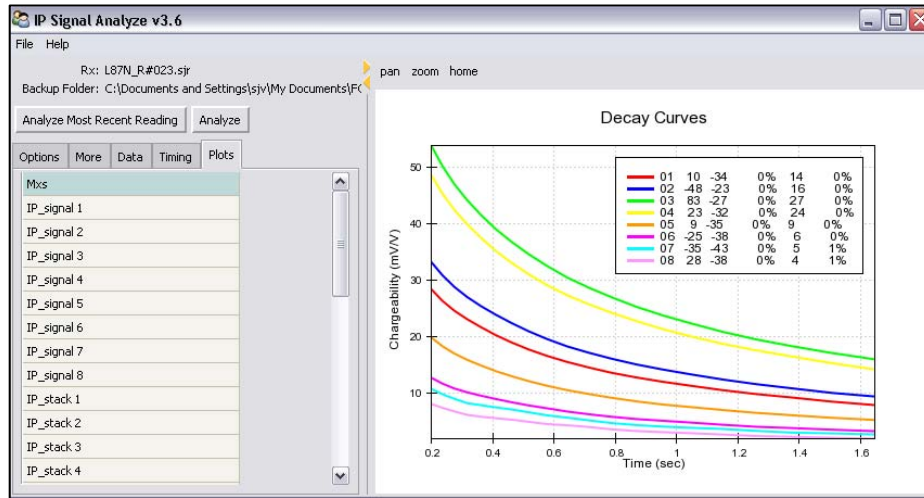


Figura 2. 4 Ventana del Analyze con curvas de decaimiento para 8 dipolos.

IP\_signal # corresponde a la señal registrada para el canal y al seleccionarla aparece una grafica Tiempo [s] vs Voltaje [mV] (Figura 2.5)

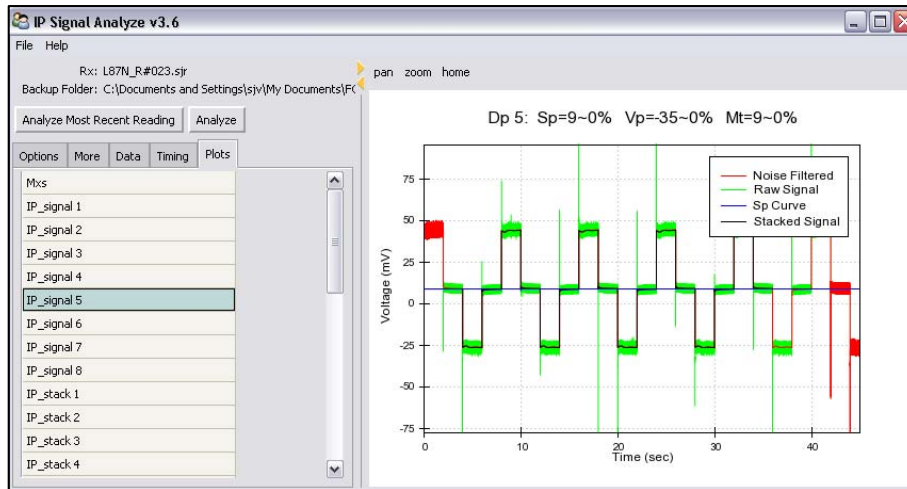


Figura 2. 5 Ventana del Analyze que muestra la señal registrada para el canal 5 de un arreglo de 8 dipolos

### II. 3 Georeferenciación: Location Manager.

Coordenadas con buen rango de precisión en los estudios de PI son cruciales para el éxito en el análisis e interpretación de los datos geofísicos recolectados. Estas coordenadas pueden ser provistas por el cliente utilizando un GPS o una estación total, o pueden ser obtenidas por el personal de campo al mismo tiempo que desarrolla el estudio.

Mediante Location Manager, se construye una base de datos con la información espacial de la malla incluyendo los remotos. Esta base de datos consta de dos partes: un sistema de coordenadas locales, el cual se utiliza para referenciar espacialmente las pseudosecciones y modelos invertidos; y otro sistema de coordenadas reales, en sistema UTM, el cual se utiliza para los cálculos geofísicos. Esta base de datos será utilizada en los programas JavIP y Pythip.

Para iniciar a construir la base de datos en Location Manager, es necesario crear primero un archivo en una hoja de cálculo el cual debe contener dos hojas, la primera es llamada -Line- la cual incluye los datos de cada línea en el proyecto en ocho columnas:

- Line
- Series
- Station
- Zone: zona UTM.
- Eastings: coordenada Este.
- Northings: coordenada Norte.
- Elevation: Elevación en metros.
- Comments.

En ambas hojas, las columnas Line y Station corresponden a la numeración especificada por el cliente para nombrar el sistema de coordenadas locales, si la orientación de las líneas es Norte-Sur o Este-Oeste, dicha numeración para identificar las líneas y estaciones corresponden a los últimos 4 o 5 dígitos de las coordenadas UTM.

Este archivo debe ser actualizado cada vez que se termine una línea de potencial y puede incluir todas las líneas del proyecto, JavIP utilizará solamente las coordenadas específicas para cada línea.

Al iniciar el programa Location Manager, hay que crear un archivo con el nombre del proyecto, después ir al menú Location, el submenú Initialize y seleccionar Grid, la ventana –Add Grid- aparecerá mostrando los campos que deben ser llenados para que el programa construya la base de datos (Figura 2.6)

**Figura 2. 6 Ventana –AddGrid**

El siguiente paso es cargar los archivos de la hoja de cálculo en el programa y este creará un archivo final con extensión .mdb, el cual se utilizará en JavIP y Pythip.

## **II. 4 Preprocesado en la etapa de Campo: JavIP.**

Este programa es una aplicación de Java y está desarrollado por SJ Geophysics Ltd. como herramienta en el pre procesamiento de datos de polarización inducida (PI) y resistividad en el dominio del tiempo para realizar el control de calidad de dichos datos. Este programa utiliza una base de localización espacial de la malla bajo estudio previamente creada para poder calcular la resistividad aparente y cargabilidad aparente. Este software contiene herramientas interactivas para el control de calidad como: graficas de curvas de decaimiento, graficas de parámetros calculados y graficas de puntos de los diferentes parámetros calculados. El programa fue diseñado para funcionar en los múltiples sistemas operativos, sin embargo la última versión trabaja apoyándose en las bases de datos de localización de Microsoft Access con un intermediario como es el Location Manager que solamente funciona para el sistema operativo Windows. Nos enfocaremos solamente en mostrar la utilización del software..

### **II.4.1 Importar datos de Resistividad y PI**

El Programa JavIP carga los archivos con extensión (.xml), se crea una nueva base de datos para cada línea de potencial bajo estudio (Database->New), una vez creada la base de datos se procede a cargar los datos recolectados en campo (Import->Import XML Files) (Figura 2.7), elegiremos los archivos a cargar de la carpeta donde los guardamos al adquirirlos en campo con el Acquire y aparecerán en la sección de Readings view (Chen, 2012).

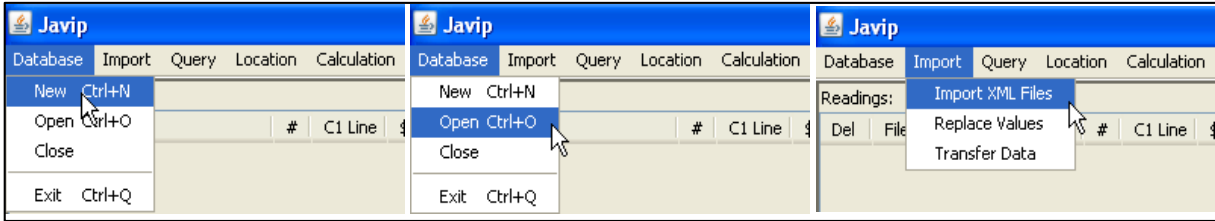


Figura 2. 7 Modo a seguir para crear una base de datos, abrirla o importar datos

#### II.4.2 Cálculo de la resistividad y parámetros de PI

Para calcular la cargabilidad aparente, resistividad aparente y los errores de cargabilidad y resistividad se realizan las siguientes acciones: lo primero que se hace es cargar el archivo de localización (Location->Open Location Database) seleccionándolo de la carpeta donde se guardo el archivo con la base de datos de localización previamente realizada con apoyo del Location Manager, después calculamos la cargabilidad (para este caso no es necesario cargar el archivo de localización), resistividad (Calculation->Calculate Mx o Calculate All) (Figura 2.8).

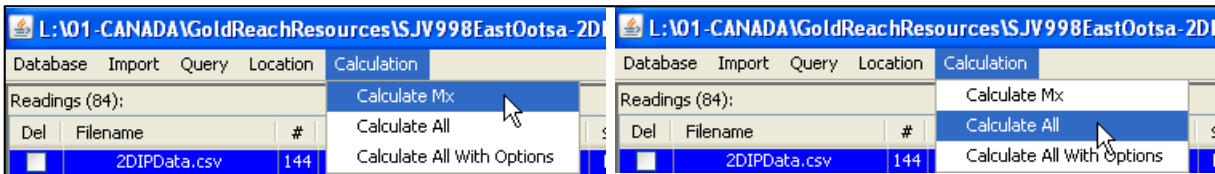


Figura 2. 8 a seguir para calcular la cargabilidad, resistividad y demás parámetros

#### II.4.3 Explicación de las diferentes secciones de la ventana del software

El programa muestra una ventana con cuatro subdivisiones dentro de ella donde se pueden observar las diferentes secciones como: Readings view, Tab selectable view, Comments view y Observation view (Figura 2.9), también cuenta con una serie de seis pestañas de atributos sobre la sección de Tab selectable view tales como: Attributes, Labels, Dipoles, Locations, Decays y Dots

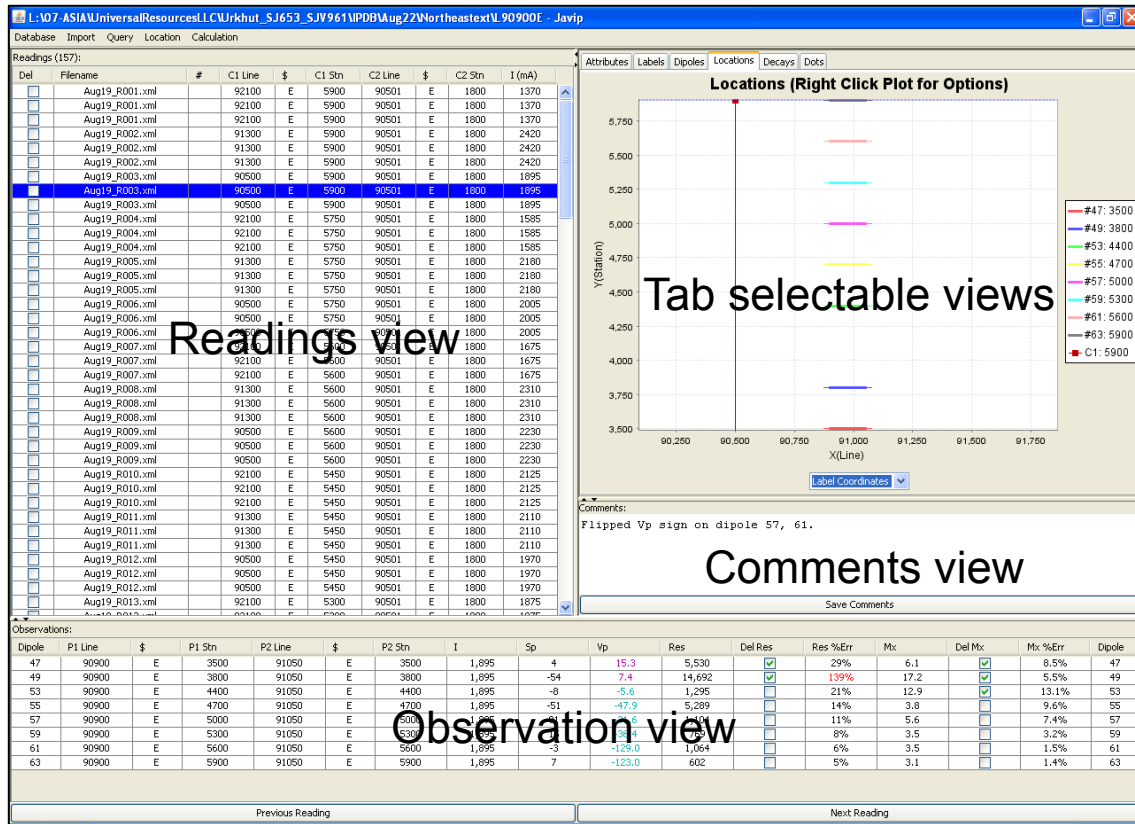


Figura 2. 9 Ventana del programa JavIP

- **Readings view:** Esta sección muestra las lecturas tomadas por un receptor para una corriente determinada inyectada al subsuelo. Una lectura contiene casillas con las siguientes especificaciones, de izquierda a derecha: “Del” que funciona para elegir una lectura y poderla borrar de la base de datos; “File name” en ésta columna aparece el nombre de la lectura que se carga a la base de datos; “C1 Line” es la columna donde se muestra el numero de la línea con la que se ésta trabajando (electrodo de corriente); “\$” es la columna donde se ve la serie de la línea de corriente; “C1 Station” es la columna donde se ve la estación del electrodo de corriente (el que se va moviendo); “C2 Line” aquí aparece el numero de la línea de corriente donde se encuentra ubicado el electrodo que llevamos al infinito (remoto); “\$” aquí se ve la serie de la línea del remoto, “C2 Station” aparece el numero de estación donde se encuentra ubicado el remoto; “I (mA)” aparece el valor de la corriente de inyección para dicha lectura. Esta ventana es solo de lectura. (Figura 2.10).

Readings (34):

Del	Filename	#	C1 Line	\$	C1 Stn	C2 Line	\$	C2 Stn	I (mA)
<input type="checkbox"/>	L07N_R#001.sjr		700	E	2050	800	E	1000	3400
<input type="checkbox"/>	L07N_R#002.sjr		700	E	2100	800	E	1000	3500
<input type="checkbox"/>	L07N_R#003.sjr		700	E	2150	800	E	1000	1400
<input type="checkbox"/>	L07N_R#004.sjr		700	E	2200	800	E	1000	1100
<input type="checkbox"/>	L07N_R#006.sjr		700	E	2250	800	E	1000	1500
<input type="checkbox"/>	L07N_R#008.sjr		700	E	2350	800	E	1000	1200
<input type="checkbox"/>	L07N_R#009.sjr		700	E	2300	800	E	1000	600
<input type="checkbox"/>	L07N_R#010.sjr		700	E	2400	800	E	1000	1100
<input type="checkbox"/>	L07N_R#011.sjr		700	E	2400	800	E	1000	1100
<input type="checkbox"/>	L07N_R#012.sjr		700	E	2450	800	E	1000	1500
<input type="checkbox"/>	L07N_R#013.sjr		700	E	2500	800	E	1000	1100
<input type="checkbox"/>	L07N_R#014.sjr		700	E	2550	800	E	1000	800
<input type="checkbox"/>	L07N_R#015.sjr		700	E	2600	800	E	1000	1200
<input type="checkbox"/>	L07N_R#016.sjr		700	E	2650	800	E	1000	1500
<input type="checkbox"/>	L07N_R#017.sjr		700	E	2700	800	E	1000	1300
<input type="checkbox"/>	L07N_R#018.sjr		700	E	2750	800	E	1000	1300
<input type="checkbox"/>	L07N_R#019.sjr		700	E	2800	800	E	1000	2200
<input type="checkbox"/>	L07N_R#020.sjr		700	E	2800	800	E	1000	2200
<input type="checkbox"/>	L07N_R#021.sjr		700	E	2850	800	E	1000	1400
<input type="checkbox"/>	L07N_R#022.sjr		700	E	2900	800	E	1000	1300
<input type="checkbox"/>	L07N_R#023.sjr		700	E	2950	800	E	1000	1500
<input type="checkbox"/>	L07N_R#024.sjr		700	E	3000	800	E	1000	1300
<input type="checkbox"/>	L07N_R#025.sjr		700	E	3050	800	E	1000	1000
<input type="checkbox"/>	L07N_R#026.sjr		700	E	3100	800	E	1000	1500
<input type="checkbox"/>	L07N_R#027.sjr		700	E	3200	800	E	1000	1200
<input type="checkbox"/>	L07N_R#028.sjr		700	E	3150	800	E	1000	1000

Figura 2. 10 Sección Readingsview

- **Observation view:** Cuando una lectura es seleccionada en la sección de lecturas (Reading view) aquí se muestran: “Dipole” es el numero de dipolo de dicha lectura; “P1 Line” es el numero de línea de potencial con el que se está registrando; “\$” se refiere a la serie de la línea de potencial; “P1 Station” se refiere a la estación donde inicia el dipolo del renglón; “P2 Line” es igual que “P1 Line” (el programa automáticamente rellena esta casilla igual que la anterior); “\$” es la misma referencia que la serie anterior; “P2 Station” se refiere a la estación en la cual termina el dipolo del renglón; “I” es la corriente registrada para esta lectura; “Sp” se refiere al potencial espontáneo para este dipolo; “Vp” es el voltaje primario para este dipolo; “Res” aquí aparece el valor del cálculo de la resistividad para este dipolo; “Del Res” en esta columna es donde se comienza la limpieza de los datos borrando algunas resistividades; “Res % Err” aparece el porcentaje de error para este dipolo en el cálculo de la resistividad; “Mx” aquí aparece el valor de la cargabilidad para este dipolo; “Del Mx” en esta columna se pueden borrar las curvas de decaimiento que se vean mal (limpieza de datos); “Mx % Err” se muestra el porcentaje de error para la cargabilidad calculada en este dipolo. (Figura 2.11).

Observations:

Dipole	P1 Line	\$	P1 Stn	P2 Line	\$	P2 Stn	I	Sp	Vp	Res	Del Res	Res %Err	Mx	Del Mx	Mx %Err
1	700	E	2800	700	E	2750	3,400	-22	12.5	288	<input type="checkbox"/>	17%	32.7	<input type="checkbox"/>	0.2%
2	700	E	2750	700	E	2700	3,400	33	17.0	352	<input type="checkbox"/>	18%	30.3	<input type="checkbox"/>	0.3%
3	700	E	2700	700	E	2650	3,400	-1	11.6	194	<input type="checkbox"/>	17%	25.8	<input type="checkbox"/>	0.6%
4	700	E	2650	700	E	2600	3,400	+13	28.7	365	<input type="checkbox"/>	16%	19.6	<input type="checkbox"/>	0.1%
5	700	E	2600	700	E	2550	3,400	-16	23.7	275	<input type="checkbox"/>	16%	16.5	<input type="checkbox"/>	0.5%
6	700	E	2550	700	E	2500	3,400	-31	27.4	267	<input type="checkbox"/>	17%	15.0	<input type="checkbox"/>	0.3%
7	700	E	2500	700	E	2450	3,400	-45	46.8	373	<input type="checkbox"/>	17%	16.9	<input type="checkbox"/>	0.1%
8	700	E	2450	700	E	2400	3,400	86	38.6	241	<input type="checkbox"/>	17%	17.9	<input type="checkbox"/>	0.1%
9	700	E	2400	700	E	2350	3,400	5	55.7	332	<input type="checkbox"/>	20%	16.1	<input type="checkbox"/>	0.1%
10	700	E	2350	700	E	2300	3,400	61	82.6	292	<input type="checkbox"/>	16%	19.4	<input type="checkbox"/>	0.1%
11	700	E	2300	700	E	2250	3,400	12	106.3	191	<input type="checkbox"/>	13%	22.2	<input type="checkbox"/>	0.0%
12	700	E	2250	700	E	2200	3,400	3	319.6	368	<input type="checkbox"/>	14%	17.6	<input type="checkbox"/>	0.0%
13	700	E	2200	700	E	2150	3,400	-36	770.6	461	<input type="checkbox"/>	16%	9.2	<input type="checkbox"/>	0.0%
14	700	E	2150	700	E	2100	3,400	-13	727.4	140	<input type="checkbox"/>	20%	3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0%

Previous Reading      Next Reading

Figura 1. 10 Sección Observationview



- **Comments view.** Se encuentra en la parte inferior de la sección Tab selectable views. Cuando una lectura es seleccionada en la sección Readings view en esta sección de la ventana se pueden agregar comentarios adicionales referentes a la lectura, como por ejemplo se puede anotar si la corriente bajo y en cuanto termino dicha corriente al finalizar la lectura, al salvar el comentario aparecerá siempre que se seleccione la lectura.

- **Tab selectable views:** esta sección consiste en seis pestañas de atributos que son: "Attributes"; "Labels" es una pestaña donde se asignan los valores de (C1 Line, C1 series, C1 Station, Intervalos de separación entre estaciones, C2 Line, C2 Series, C2 station y I) cada lectura (Figura 2.12);

Figura 2. 11 Pestaña labels

"Dipoles" en esta pestaña se asigna el arreglo que se está utilizando poniendo la estación de inicio y final de cada dipolo así como la separación que existe entre ellos, además del número de línea de potencial y su serie (P1 Line, \$, P1 Station, P2 Line, P2 Station, Dist) (Figura 2.13);

Dipole	P1 Line	\$	P1 Stn	P2 Line	\$	P2 Stn	Dist	Delete
1								<input type="checkbox"/>
2								<input type="checkbox"/>
3								<input type="checkbox"/>
4								<input type="checkbox"/>
5								<input type="checkbox"/>
6								<input type="checkbox"/>
7								<input type="checkbox"/>
8								<input type="checkbox"/>
9								<input type="checkbox"/>
10								<input type="checkbox"/>
11								<input type="checkbox"/>
12								<input type="checkbox"/>

Figura 2. 12 Pestaña Dipoles

“Locations” esta pestaña muestra los dipolos a lo largo de la línea definidos por un color asignado a cada uno y se pueden ver en coordenadas Locales o UTM (definido en la sección del Location Manager) (Figura 2.14);

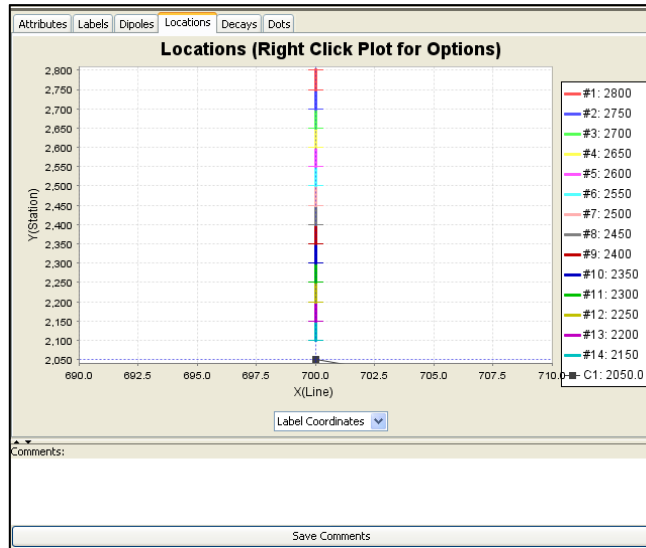


Figura 2. 13 Pestaña Locations

“Decays” esta pestaña nos muestra las curvas de decaimiento en una grafica Tiempo [ms] vs Cargabilidad [mV/V], de lado derecho nos muestra cada uno de los dipolos con un color distinto para ubicarlos de mejor manera (Figura 2.15);

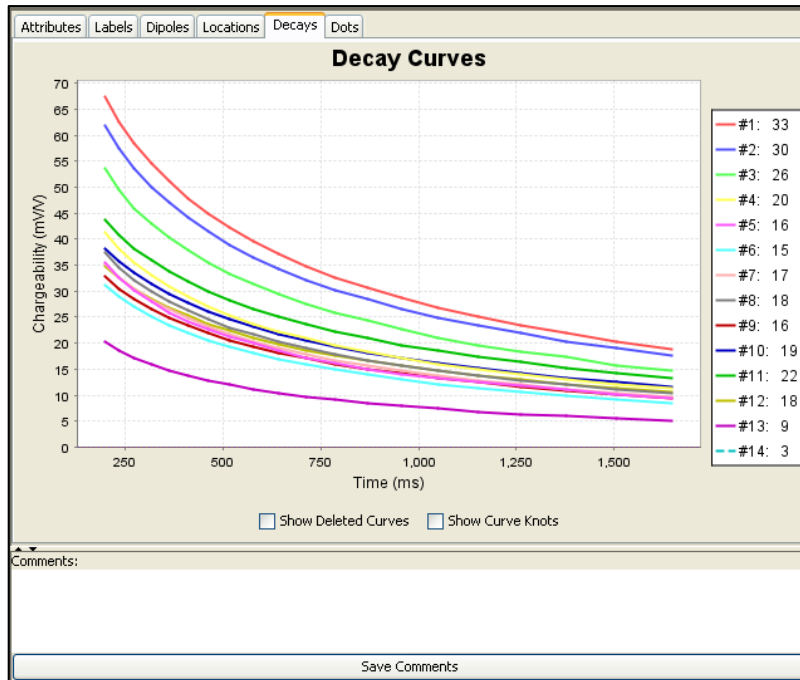


Figura 2. 14 Pestaña Decays

“Dots” es la ultima pestaña donde todos los datos pertenecientes a la base son mostrados como puntos en una grafica de Estaciones de Corriente vs Estaciones de Potencial, aquí

podemos ver la grafica para la resistividad que nos es dada en colores con un rango menor a mayor en [Ohms-m]; para el caso de la grafica de la cargabilidad el rango va de menor a mayor en [mV/V]; el SP lleva un rango en [mV] y las dos graficas restantes (porcentaje de error de resistividad y porcentaje de error de cargabilidad), esta es una herramienta para hacer la limpieza de datos (Figura 2.16).

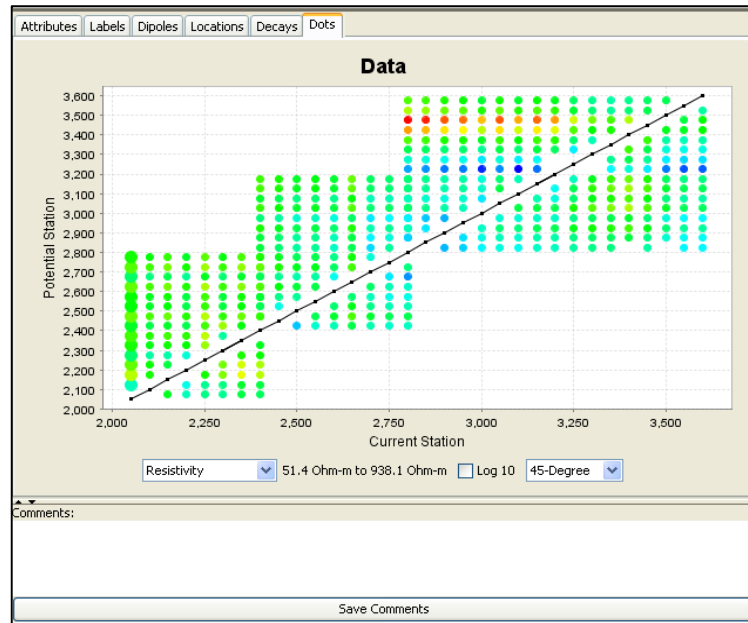


Figura 2. 15 Pestaña Dots

## II. 5 Pseudosecciones 2D: Pythip y UBC DCIP2D.

Las pseudosecciones son utilizadas para graficar los datos de PI y Resistividad mediante contornos de iso-valores aparentes. Loke (Loke, 2004) demuestra mediante el uso de modelos sintéticos que para un mismo marco geológico, el uso de diferentes arreglos de electrodos genera pseudosecciones distintas: el objetivo de estudio esta distorsionado tanto espacial como geoméricamente. Esto se debe a que el punto de atribución es distinto para cada uno de los arreglos de electrodos. En el caso de estudios 2D el punto de atribución estará sobre la misma línea o perfil, pero en estudios 3D el punto de atribución estará entre la línea de corriente y a línea de potencial. Otro factor a considerar es que la profundidad real del objetivo se desconoce en una pseudosección. Por lo anterior, las pseudosecciones pueden ayudar en las evaluaciones geológicas, pero no se deben tomar en cuenta como un resultado definitivo para propósitos cuantitativos, de ahí el prefijo *pseudo*.

El programa Pythip es una interfase que genera diferentes tipos de archivos con datos 2D o 3D basándose en el punto de atribución en cada caso, combinando las bases de datos de JavIP y

Location Manager. Estos archivos son de topografía, resistividad aparente, cargabilidad aparente y el Vp normalizados por la corriente en mA (Vp/I), los cuales tienen las extensiones .topo, .res, .chg, y .pot respectivamente. Para los archivos .res, .chg y .pot, Pythip los acomoda en seis columnas: la posición geométrica de los electrodos de corriente seguida de la posición de los electrodos de potencial, el valor registrado (resistividad o cargabilidad aparentes, voltaje primario sobre corriente, según sea el caso), y el porcentaje de error de dicho valor:  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $M_i$ ,  $N_i$ ,  $Val_i$ , % Error de  $Val_i$ .

Para crear estos archivos en Pythip, basta con cargar las bases de datos de JavIP (archivo .properties) y Location manager (archivo .mdb) y seleccionar la opción Run UBC 2D (Figura 2.17).

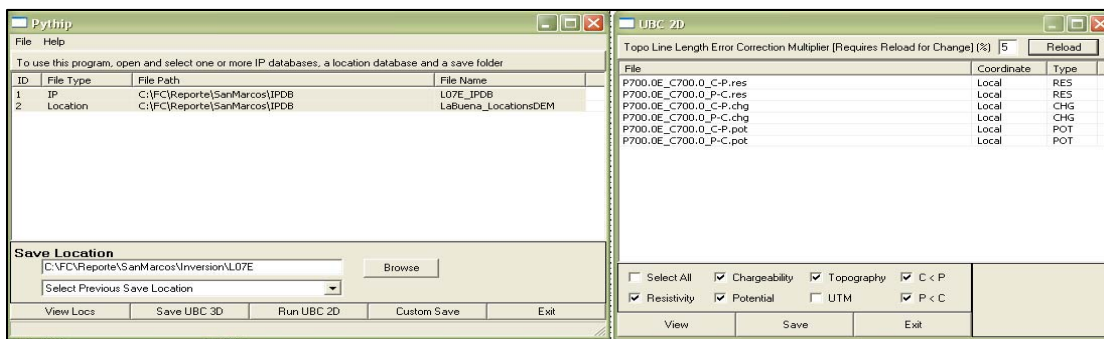


Figura 2. 16 Pythip y ventana UBC

Una ventana se desplegará (UBC), la cual sirve para seleccionar los archivos que se van a guardar para ser utilizados posteriormente en UBC DCIP2D y crear las pseudosecciones o en el caso 2D la inversión de datos.

### Archivos C<P y C>P

Como se puede observar en la figura 2.17, existen dos archivos para cada tipo RES, CHG y POT: C<P y C>P. El archivo C<P incluye los datos de las estaciones de corriente antes de los dipolos de potencial. El archivo C>P muestra los pares de corriente-potencial donde la corriente esta después del dipolo de potencial. Pythip divide los datos en C<P o P<C siguiendo la convención del programa UBC DCIP2D: “Se asume que el estudio es llevado a cabo a lo largo de una línea en la dirección x” y basándose en la configuración de electrodos convencional, donde la corriente fluye del electrodo A al electrodo B. De acuerdo con lo anterior, los valores en los archivos C<P y C>P tendrán una polaridad positiva o negativa, dependiendo del flujo de corriente, sin importar la polaridad con la que hayan sido registrados en campo. Sí por ejemplo, se observan los datos de la línea 900E del proyecto La Buena, cuando la corriente es inyectada en la estación 3375N, se puede notar en el siguiente diagrama (Figura 2.18) y tabla 2.1, el tipo

de archivo en que los valores de Vp/I son separados según su posición, en C<P o C>P en el caso del tipo .por:

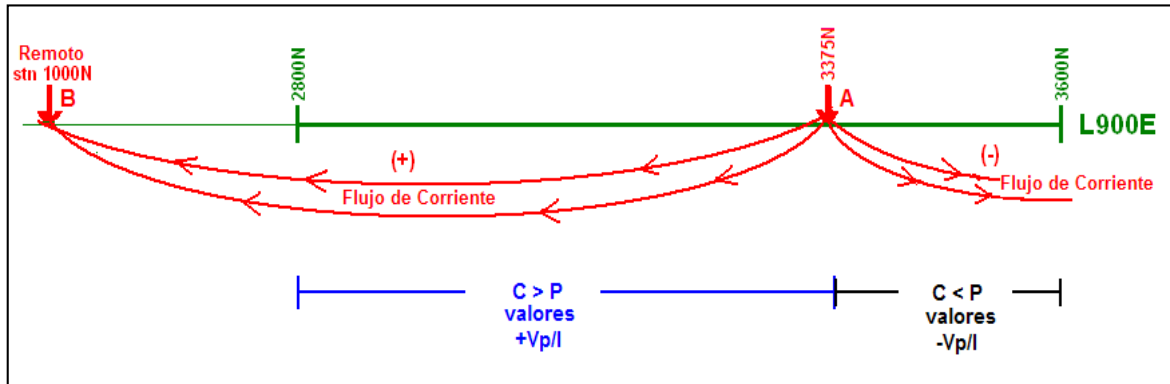


Figura 2. 17 Diagrama del flujo de corriente en el punto de inyección 3375N y la polaridad de los valores Vp/I para las zonas C<P y C>P.

La tabla 2 muestra la posición geométrica de los electrodos en las primeras cuatro columnas, la quinta columna muestra los valores de Vp/I de los archivos .pot C<P y C>P, tal y como son organizados en Pythip. Las columnas seis y siete muestran los valores de Vp y corriente tal cual aparecen en JavIP; la columna ocho es el cociente y la columna nueve muestra la zona que le corresponde y el tipo de archivo en el que es asignado dicho valor por Pythip. Se puede notar que la polaridad ha sido invertida por Pythip, tomando en cuenta el diagrama de flujo de corriente de la figura 2.18.

C1 (A)	C2 (B)	P1 (M)	P2 (N)	Pythip Vp/I	Vp raw data	I [mA]	Vp raw / I	Zone
3375	992	3598	3547	-0.0459407	41.3	900	0.04588889	C<P
3375	992	3547	3496	-0.0848006	76.3	900	0.08477778	C<P
3375	992	3496	3446	-0.3899598	351	900	0.39	C<P
3375	992	3446	3398	-0.4347392	391.3	900	0.43477778	C<P
3375	992	3347	3298.284	1.657511	-1491.8	900	-1.65755556	C>P
3375	992	3298.284	3247	0.355507	-320	900	-0.35555556	C>P
3375	992	3247	3198	0.0851456	-76.6	900	-0.08511111	C>P
3375	992	3198	3147	0.0365601	-32.9	900	-0.03655556	C>P
3375	992	3147	3099	0.0452726	-40.7	900	-0.04522222	C>P
3375	992	3099	3047	0.0205234	-18.5	900	-0.02055556	C>P
3375	992	3047	2998	0.0169302	-15.2	900	-0.01688889	C>P
3375	992	2998	2950	0.0139184	-12.5	900	-0.01388889	C>P
3375	992	2950	2897	0.0055634	-5	900	-0.00555556	C>P
3375	992	2897	2847	0.0050826	-4.6	900	-0.00511111	C>P
3375	992	2847	2788.815	0.0041026	-3.7	900	-0.00411111	C>P

Tabla 2 Datos para la estación de corriente 3375N.

En un estudio tradicional 2D los dipolos están siempre en frente de la corriente pero para el estudio 3D, el separar los archivos de esta forma da información extra de la corriente ya que la trayectoria de ésta es diferente para dos puntos de atribución en la misma posición, la figura 2.19, bosqueja de manera sencilla lo anterior:

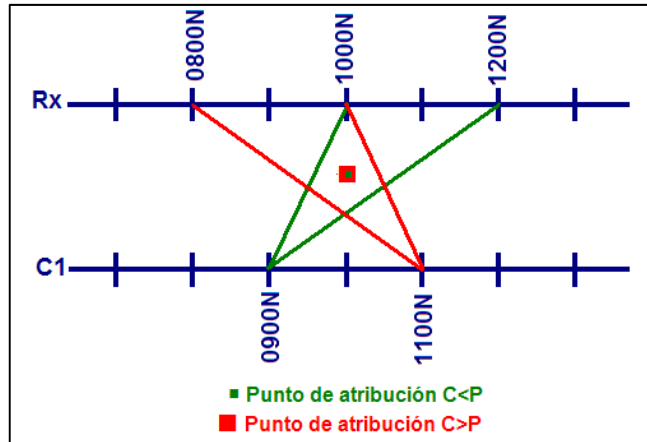


Figura 2. 18 Esquema para C<P y C>P.

El programa UBC DCIP2D ha sido desarrollado por el departamento de Geophysical Inversion Facility de la Universidad de British Columbia en Canadá. Su uso requiere licencia para fines comerciales. Es un programa de inversión de datos 2D, el cual se divide en dos algoritmos principales: DC e IP: DC invierte los valores  $V_p/l$  del archivo .pot, utilizando este valor para calcular las resistividades, mientras que IP utiliza el archivo .chg para invertir los datos de cargabilidad aparente y obtener el modelo de cargabilidades. Es importante mencionar que archivos 3D no deben ser invertidos en este programa, ya que los algoritmos que utiliza, son para un arreglo convencional asumiendo que el estudio ha sido llevado a cabo en una línea como ya se había mencionado, sin embargo es útil para construir pseudosecciones 2D a partir de datos 3D, tomando en cuenta que dicha pseudosección corresponderá a una línea entre las líneas de potencial y de corriente, por el punto de atribución en esta configuración. Las pseudosecciones bidimensionales son creadas en este programa cargando los archivos C<P, P>C. En este caso los tipos de archivos utilizados serán los .chg y .res, para obtener las pseudosecciones de cargabilidad aparente y resistividad aparente, respectivamente utilizando el algoritmo IP. Además se puede cargar el archivo .topo para incluir en la pseudosección el perfil topográfico. Una vez cargados los archivos, basta con oprimir el botón View Data/Error para obtener la pseudosección (Figura 2.19).

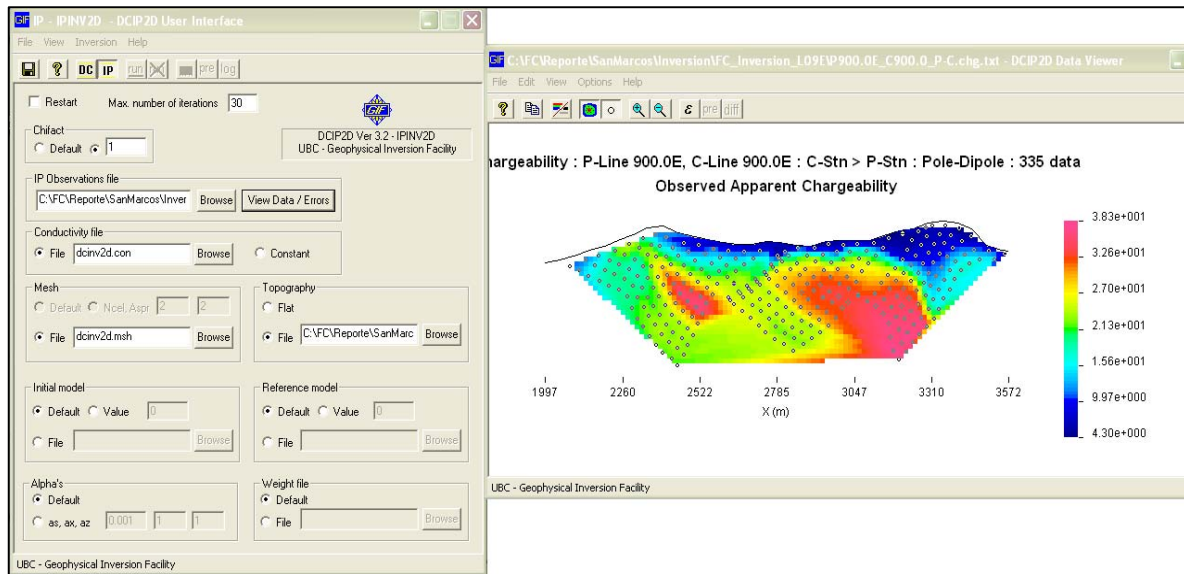


Figura 2. 19 Programa UBC DCIP2D y pseudosección de cargabilidad aparente, datos C>P.

La finalidad de realizar pseudosecciones en la etapa de campo es para poder observar la tendencia de las anomalías y poder hacer recomendaciones oportunas sobre añadir más líneas a la malla o extender en longitud las líneas existentes.

## II.6 Inversión 2D en UBC DCIP2D

Las ecuaciones optimizadas que este programa utiliza han sido descritas en el capítulo 1. Cuando una inversión comienza, a menos que el usuario defina un modelo inicial o de referencia, el programa utiliza como modelo un semi-espacio uniforme como punto de partida, lleva a cabo un modelado directo en ese semi-espacio y lo compara con los datos de campo. El resultado de esta comparación es el misfit del modelo. Después de esto, el modelo invertido es producido (Thibaud Charlotte, 2013, comunicación personal).

Después la inversión lleva a cabo otro modelado directo pero esta vez con el modelo que se acaba de generar, y un nuevo modelo se produce, el cual trata de minimizar las diferencias entre los datos del modelo directo (datos predichos) y los datos de campo (datos observados).

Cada uno de estos ciclos es una iteración en el programa y las curvas del misfit y de la norma, también llamadas curvas de convergencia, se pueden observar en el visor del modelo 2D. La inversión seguirá haciendo ciclos a través de las iteraciones hasta que el target misfit sea alcanzado. El programa decide que el target misfit sea igual al número de datos multiplicado

por un factor llamado “chi”. Por default este valor es igual a 1, por lo que el target misfit es igual al número de datos, pero este factor chi puede ser modificado.

Si la calidad de los datos es bastante buena, poco ruido, entonces es deseable tener la mayor cantidad de datos como sea posible y forzar la inversión a crear más estructuras. Una manera de lograr esto es utilizar un factor chi menor a 1, por lo que el target misfit es menor que el número de datos. Por otro lado, si los datos son demasiado ruidosos, lo que no se debe esperar es que la inversión sobre-ajuste los datos y un factor chi mayor que 1 puede ser utilizado. En el programa, este factor chi se puede elegir como “default” u otro valor, sí se elige otro valor el target misfit será igual al número de datos multiplicado por dicho valor seleccionado. Una buena manera de seleccionar el modelo adecuado basándose en las restricciones realizadas para la optimización de la función objetivo descrito en el capítulo 1, es que: target misfit  $\approx$  número de datos, pero si el target misfit  $\ll$  número de datos, se dice que el modelo esta sobre-ajustado y presentara mayor número de estructuras de las que existen, en el caso contrario, cuando un modelo es sub-ajustado el target misfit  $\gg$  número de datos y las anomalías en el modelo tienden a ser movidas cerca de la superficie y pierden amplitud.

Una vez que la inversión finaliza se eliminan las celdas extras utilizando la función “Padding Cells” en el visor del modelo. Esta función minimiza el ruido ocasionado por los efectos de borde típicos en problema no lineales. Si estas celdas no se eliminan, o no se eliminan las suficientes, se corre el riesgo de introducir efectos de borde en el modelo o al menos, más del que debería tener.



## Capítulo III. Proyecto *La Buena*, malla *La Julia*.

Estudios de Polarización Inducida y Resistividad en 2 y 3 dimensiones (2DIP y 3DIP, por sus siglas en inglés) fueron realizados por SJ Geophysics Ltd. en la propiedad La Buena de San Marcos Resources Inc., en la zona denominada *La Julia*. Los estudios se dividen en 2 etapas: la primera de Noviembre 25 a Diciembre 7 de 2010 y la segunda etapa de Julio 24 a Agosto 2, 2011..

La exploración geofísica en superficie realizada por SJ Geophysics Ltd. es parte del programa de exploración por parte de San Marco Resources Inc. el cual incluye mapeo geológico, geoquímica y barrenación. El propósito de los estudios geofísicos es localizar anomalías de cargabilidad y resistividad las cuales puedan ser utilizadas para mejorar la resolución del sistema estructural e identificar posibles zonas de mineralización debajo del horizonte de aluvión que cubre casi la mitad de la zona de la Julia.

### III.1 Generalidades y Marco Geológico.

El proyecto La Buena se localiza en el estado de Zacatecas, México (Figura 3.1), el área corresponde al ejido El Jagüey. La comunidad más grande cercana es Concepción del Oro, la cual está a 35 Km. aproximadamente al sureste del área del proyecto La Buena (Figura 3.2).

El proyecto La Buena se localiza en terreno semiárido. La fauna en el área es ganado vacuno, así como halcones, zopilotes, víboras de cascabel y pequeños mapaches, son parte de la vida silvestre observada durante la duración del estudio. La vegetación consiste en su mayoría en diferentes tipos de cactáceas, agaves, mezquites y arbustos, la cual fue lo suficientemente densa para requerir cortar brechas a lo largo de las líneas (Cervantes, 2010).

#### **Localización.**

El proyecto La Buena se localiza en el estado de Zacatecas, México (Figura 3.1), el área corresponde al ejido El Jagüey. La comunidad más grande cercana es Concepción del Oro, la cual está a 35 Km. aproximadamente al sureste del área del proyecto La Buena (Figura 3.2).



Figura 3. 1 Localización del proyecto La Buena en el estado de Zacatecas, México.

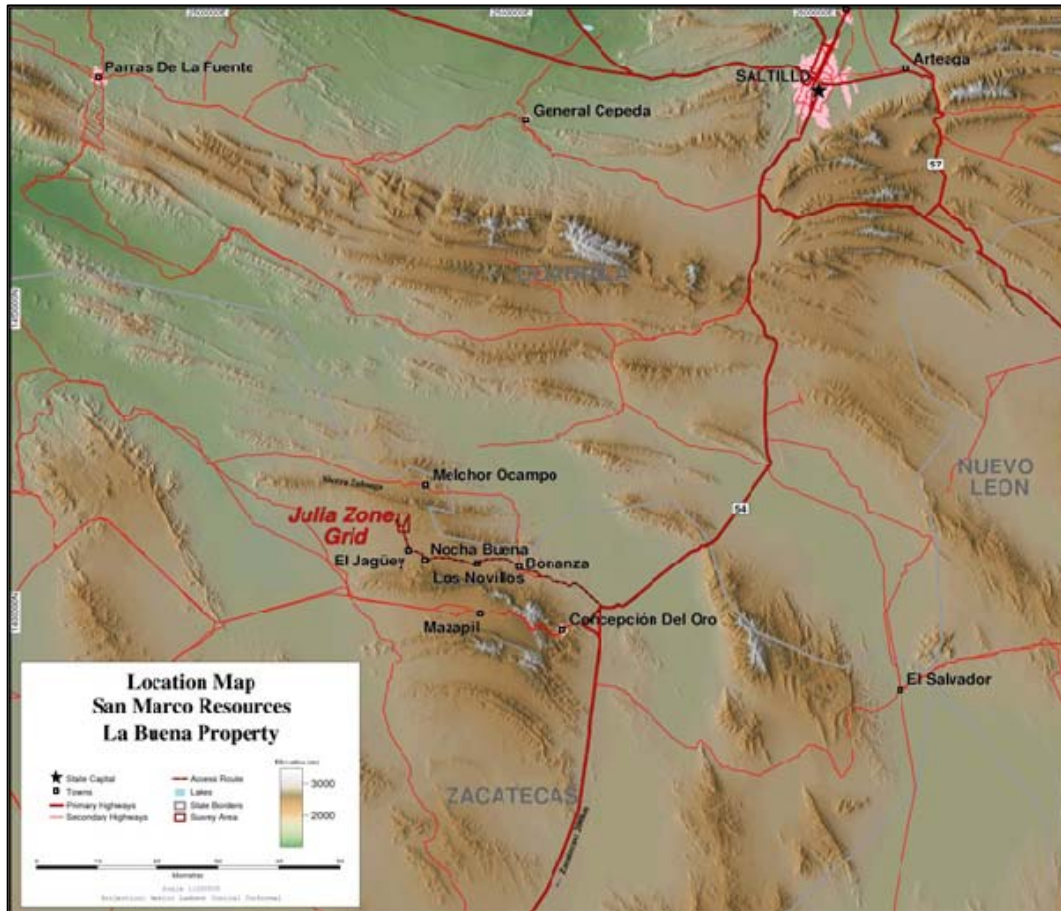


Figura 3. 2 Mapa regional del proyecto La Buena mostrando poblaciones y rutas de acceso

El proyecto La Buena se localiza en terreno semiárido. La fauna en el área es ganado vacuno, así como halcones, zopilotes, víboras de cascabel y pequeños mapaches, son parte de la vida silvestre observada durante la duración del estudio. La vegetación consiste en su mayoría en diferentes tipos de cactáceas, agaves, mezquites y arbustos, la cual fue lo suficientemente densa para requerir cortar brechas a lo largo de las líneas.

En ambas etapas, San Marco Resources Inc. marcó y señaló las líneas utilizando una estación total. Las coordenadas fueron adquiridas en sistema UTM, usando el datum NAD27 México, zona 14 para referenciar espacialmente cada una de las estaciones: durante la etapa 1, las coordenadas no fueron provistas de manera correcta y a tiempo, por lo que SJ Geophysics Ltd. recolectó sus propias coordenadas, la calidad de estas fue generalmente buena debido a la alta recepción satelital y el terreno abierto. Las mediciones de GPS (puntos de control) y estación total fueron obtenidas para cada estación por lo que no fue necesario interpolar información.

### ***Marco Geológico.***

El proyecto La Buena se encuentra al sur de la sierra Zuloaga, en el distrito minero Melchor Ocampo. La propiedad está situada 3 Km. al sur de el área Las Coloradas de Dia Bras Exploration y 8 Km. al norte de la mina El Peñasquito. Situada más al sur, en la región sur del distrito minero Concepción del Oro se encuentra el proyecto Camino Rojo.

Un horizonte somero de aluvi3n cubre casi la mitad del área La Julia, del proyecto La Buena. La Formación Caracol, en su mayoría limolitas calcáreas, dominan la geología en el área. La misma plataforma de carbonatos que aloja el yacimiento en los distritos de Zuloaga, Noche Buena y Providencia se encuentran al norte de la zona de La Julia a lo largo de la línea de charnela del anticlinal este – oeste que forma la prominente Sierra de Zuloaga. Intrusivos subvolcánicos monzoníticos ricos en pirita se encuentran a un par de kilómetros al sur de la sierra, formando un halo de metasedimentos correspondiente a la Formación Caracol en la zona de la Julia.

Esta zona esta descrita por San Marco Resources como una anomalía de oro en suelos de 1.25 Km. x 1.0 Km. donde diques granodioríticos con alteraciones potasicas intrusionan los metasedimentos (limolitas y areniscas) de la Formación Caracol, la cual fue el área donde se

enfoco el programa de exploración. Se ha encontrado que la mineralización está asociada con chimeneas y mantos dentro la unidad de calizas, y también asociada a lo largo de los patrones estructurales en los metasedimentos y subvolcánicos intermedios del Terciario. La mineralización de interés dentro de la zona de La Julia aparentemente está asociada con diseminados en los metasedimentos de la Formación Caracol y los subvolcánicos. Un mapa geológico de la zona de La Julia fue provisto por el cliente y se muestra en la figura 3.3 (Rastad, 2011).

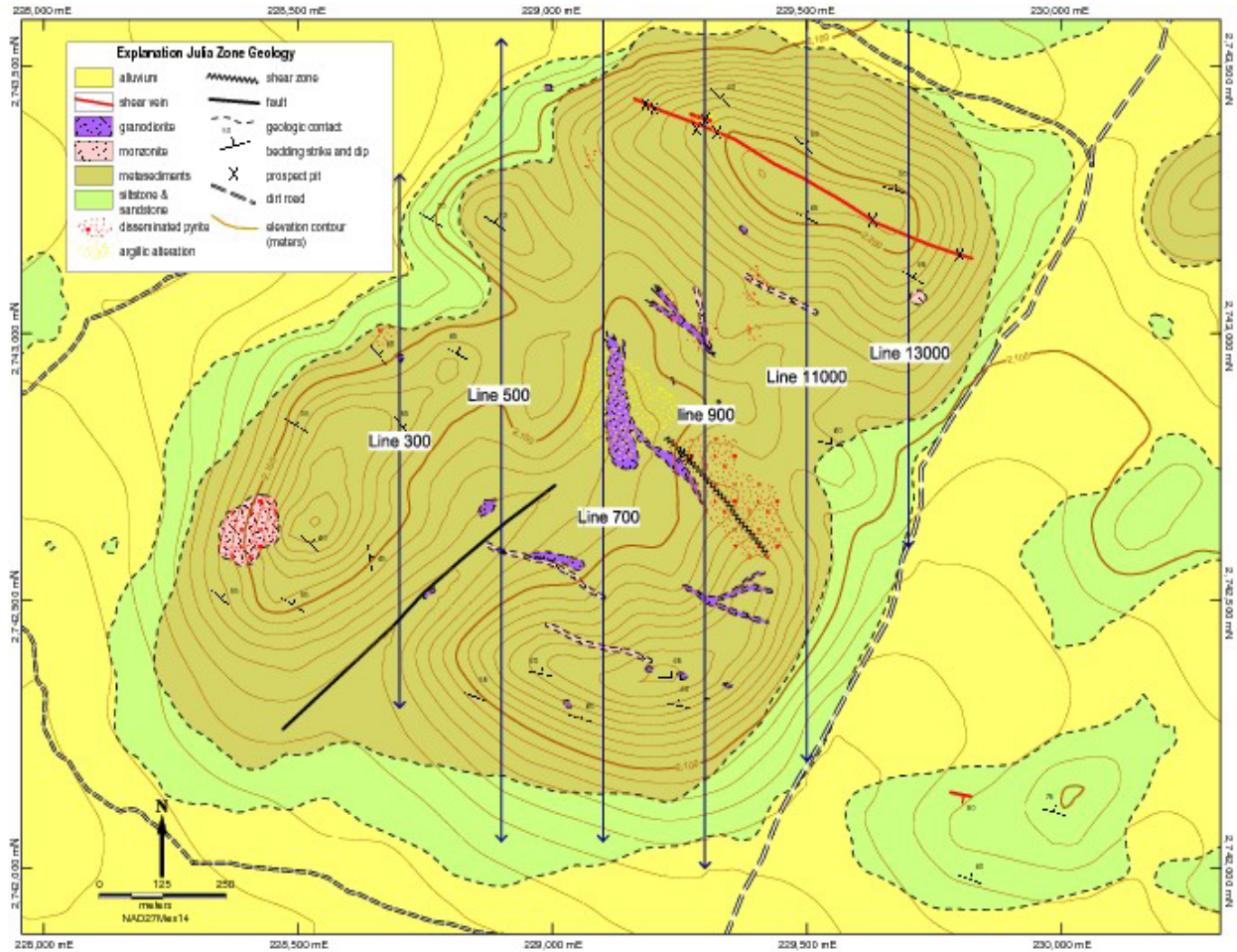


Figura 3. 3 Mapa Geológico de la zona La Julia con la malla de geofísica de la etapa 1

### III. 2 Etapa 1.

El plan original para la primera etapa de exploración geofísica fue realizar un estudio en 2D usando dipolos de potencial de 50m en un arreglo de 800m de longitud, después de los primeros resultados obtenidos, San Marco Resources Inc. y SJ Geophysics Ltd. decidieron realizar un estudio en 3D usando dipolos de potencial de 100m y dos receptores conectados en

serie para obtener mayor profundidad de penetración y mayor resolución de datos al incrementar la longitud del arreglo de potencial hasta 2400m (Figura 3.4).

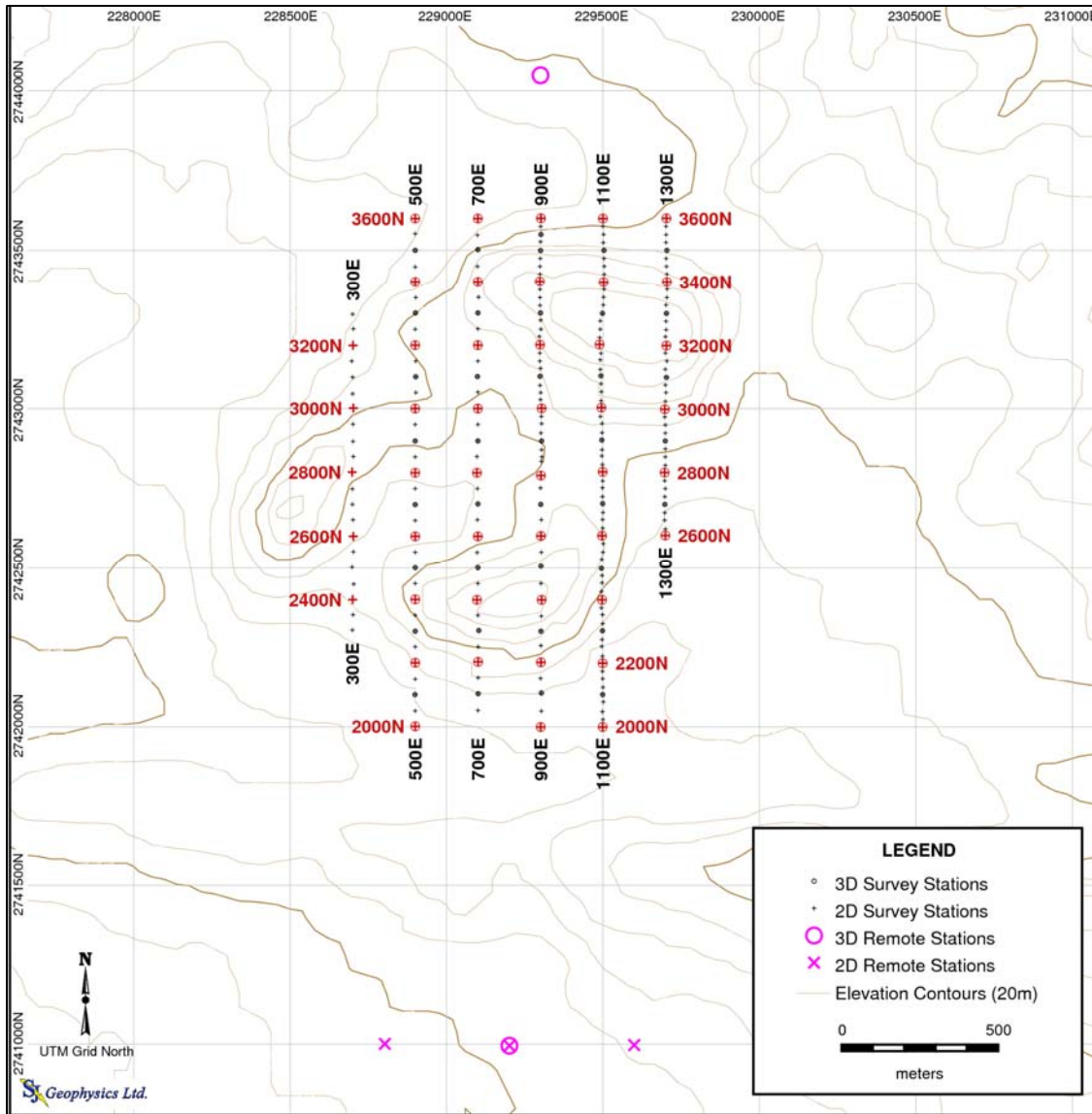


Figura 3. 3Malla La Julia, Etapa 1.

**Resumen del estudio:**

SJ Geophysics Ltd. Fue contratado por San Marco Resources Inc. para adquirir datos geofísicos en su propiedad La Buena. La siguiente tabla resume brevemente el estudio realizado durante la etapa 1 (Cervantes, 2010)

Cliente	<b>San Marco Resources Inc.</b>
Nombre del Proyecto	La Buena
Localización	<i>Latitud: N24° 46' Longitud: W101° 40'</i> <i>2742000N 230500E UTM NAD27 México Zona 14</i>
Tipo de Estudio	Polarización Inducida 3D (3DIP), Polarización Inducida 2D (2DIP)
Total de Kilómetros Lineales	2DIP: 8.35 Km, 3DIP: 7,35 Km.
Fechas de Producción	Noviembre 25 – Diciembre 7, 2010.
Objetivo	SJ Geophysics Ltd. fue contratado para realizar estudios de 2D/3DIP con el propósito de proveer modelos invertidos en 2D/3D de resistividad y cargabilidad.

**Tabla 3 Resumen de la etapa 1, Proyecto La Buena, Malla La Julia**

El equipo de trabajo desarrollo el estudio 2DIP entre Noviembre 26 y Diciembre 4 de 2010, con la intención de progresar de Oeste a Este una línea a la vez de la línea 300E a la 1300E. Sin embargo, en Noviembre 17 el cliente decidió extender las líneas, por lo que el equipo de trabajo dejo una porción de la línea 300E sin estudiar permitiendo al equipo de brecheros terminar la línea. Esta porción fue estudiada en Noviembre 29 después de completar la línea 500E. Las estaciones de corriente fueron situadas cada 50m en la misma posición de los electrodos de potencial. Estos puntos de inyección después fueron movidos en el punto medio de los dipolos de potencia por recomendación de SJ Geophysics Ltd. Estas estaciones intermedias fueron marcadas por el equipo de trabajo de SJ.

Basado en los resultados preliminares de 2DIP, el cliente y SJ Geophysics Ltd. añadieron el estudio 3DIP a esta etapa, el cual fue realizado del 5 al 7 de Diciembre de 2010, también de este a oeste, pero 3 líneas fueron estudiadas simultáneamente; alternando la líneas corriente – receptor – corriente. Debido a problemas entre el cliente y los ejidatarios, el estudio 3DIP fue realizado de manera apresurada, lo que resulto en detrimento de la calidad de datos, así como la línea de potencial 1100E no pudo ser terminada, ya que los ejidatarios retiraron el permiso para realizar la exploración y el equipo de trabajo fue expulsado de la propiedad.

**Información de la Malla:**

La malla estudiada fue sobre el área conocida como La Julia, esta malla consiste en seis líneas equiespaciadas 200m una de otra. Las líneas fueron nombradas como 300E a 1300E. El estudio 2DIP registro todas las líneas, mientras que para el estudio 3DIP se utilizaron de la línea 500E a la 1300E. Todas la líneas fueron orientadas sur -norte y su longitud fue variable, entre 1.0 y 1.6 kilómetros (Apéndice A). Las estaciones fueron marcadas con una estaca de

madera cada 50m y se etiquetaron de la estación 2000N a la 3600N, utilizando los últimos cuatro dígitos de la coordenada norte UTM.

<b>Malla</b>	<b>La Julia</b>
Número de líneas estudiadas	2DIP: 6, 3DIP: 5
Azimut de las líneas	0°
Espaciamiento entre líneas	200m
Espaciamiento entre estaciones	2DIP: 50m, 3DIP: 100m
Rango de elevaciones (m. s. n. m.)	2021 – 2221m

**Tabla 4 Parámetros de la Malla, etapa 1**

Durante el curso del estudio, algunos problemas de logística tuvieron que ser resueltos por el equipo de trabajo. Numerosas rupturas ocasionadas por el ganado en los alambres de corriente y los cables de receptor retrasaban el estudio mientras el equipo de trabajo reparaba dichas rupturas. Así como la topografía impedía la buena comunicación entre el equipo de trabajo, en ocasiones 2 ayudantes se utilizaban para poder conseguir buena comunicación con los radios y llevar a cabo un estudio con las medidas de seguridad adecuadas. Finalmente, el equipo de topografía contratado por el cliente para marcar las estaciones nunca entregó las coordenadas recolectadas y por este motivo, SJ Geophysics Ltd. tuvo que recolectar sus propias coordenadas utilizando GPS's Garmin 60CSx y datos de inclinación utilizando un clinómetro Suntoo.

#### ***Parámetros del estudio e instrumentación***

Durante la etapa 1, el estudio 2DIP fue llevado a cabo con el arreglo polo – dipolo convencional utilizando 16 dipolos de potencial de 50m de separación, para un arreglo total de 800m (Tabla 3). Las estaciones de inyección de corriente pasaron a través del arreglo con los puntos de inyección inicialmente situados en los mismos puntos de los electrodos de potencial. Después estos fueron situados en el punto medio de los dipolos de potencial mientras el estudio avanzaba. Cuando el punto de inyección de corriente se acercaba al final del arreglo, este era movido. Para estos movimientos del arreglo, se utilizó un empalme de 400m sobre el anterior, de esta manera, la profundidad de penetración es conservada.

Para el estudio 3DIP se utilizó el arreglo offset polo – dipolo, con 24 dipolos de 100m de separación (Tabla 3). Dos receptores fueron conectados en serie, un receptor registró 16 dipolos, mientras que el segundo receptor registró 8. Para la fase de producción, la configuración 3D consistió en registrar dos líneas de corriente por una sola línea de potencial. Las líneas de corriente se colocaron a cada lado de la línea de potencial, mientras que las subsecuentes líneas de potencial fueron estudiadas con una línea de corriente empalmada. Todos los datos fueron recolectados utilizando el sistema de SJ Geophysics Ltd.

SJ-24 Full Waveform para el receptor. La corriente fue inyectada en el subsuelo con un ciclo de trabajo de 2 segundos encendido, 2 segundo apagado por un transmisor marca GDD modelo TxII IP Serie 246. El arreglo de potencial fue implementado usando los cables de IP especializados de 8 conductores configurados con salidas a 50m para conectar los electrodos de potencial. En cada estación de corriente, los electrodos consisten en dos barras de acero inoxidable de 1m de largo y 15mm de diámetro. Para la línea de potencial, los electrodos consistieron en pots o tarros de cerámica o porosos de plástico con una solución de sulfato de cobre como electrolito, los cuales se enterraban en la superficie. La localización de los remotos de corriente consistió en cuatro barras de acero inoxidable de 1m de largo y 15mm de diámetro. La localización de estos remotos fueron adquiridos utilizando el GPS Garmin 60CSx para uso de los cálculos geofísicos (Apéndice A).

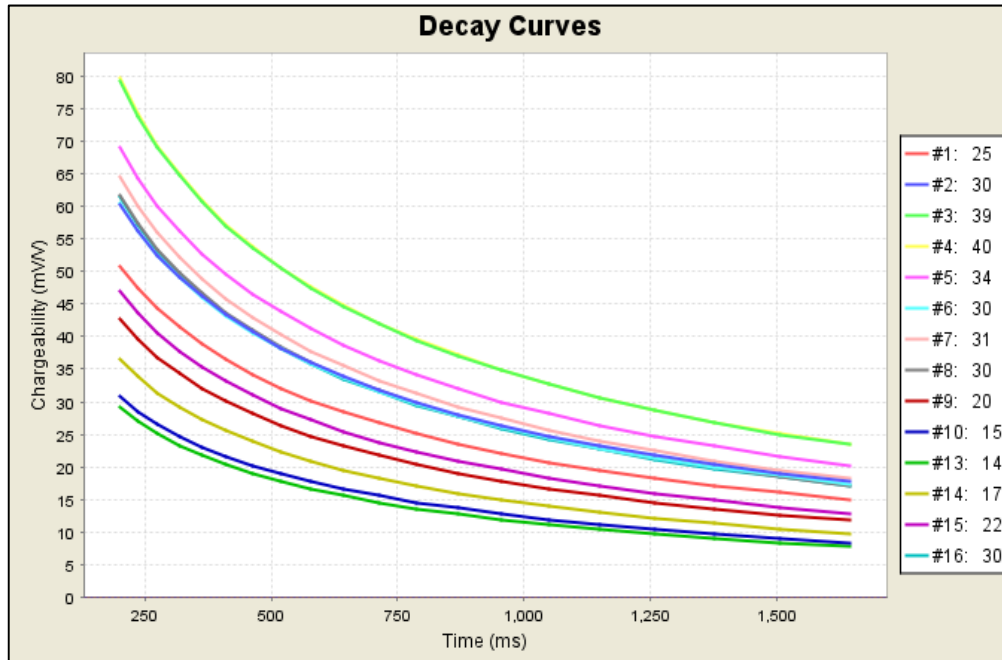
	Parámetros 2D	Parámetros 3D
Tipo de Arreglo	Polo –Dipolo	Offset Polo - Dipolo
Número de Dipolos	16	16 - 24
Longitud de los Dipolos	50m	100m
Longitud del Arreglo	800m	1600 - 2400m
Intervalos de Corriente	50m, inicialmente en los electrodos de potencial, después en el punto medio de los dipolos.	100m a cada lado de la línea de potencial.
Transmisor de PI	GDD TxII (No. Serie: 246)	
Ciclo de trabajo	50%	
Forma de Onda	Cuadrada	
Ciclo y Periodo	2 seg. ON / 2 seg. OFF; 8 segundos.	
Receptor de PI	SJ-24 Full Waveform Digital Receiver	
Tiempo de Adquisición	Mínimo 60 segundos	
Retraso Vp, Integración Vp	1200 ms., 600 ms.	
Retraso Mx, # de Ventanas	200 ms., 20	
Amplitud (Integración Mx)	36, 39, 42, 45, 48, 52, 56, 60, 65, 70, 75, 81, 87, 94, 101, 109, 118, 128, 140, 154 (200 ms. – 1800 ms.)	
Propiedades calculadas	$V_p$ , $M_x$ , $S_p$ , Res aparente	
GPS	Garmin GPSmap 60CSx	
Precisión promedio	4 m	
Proyección / Datum	NAD27 México Zona 14	

**Tabla 5 Parámetros de los Instrumentos**

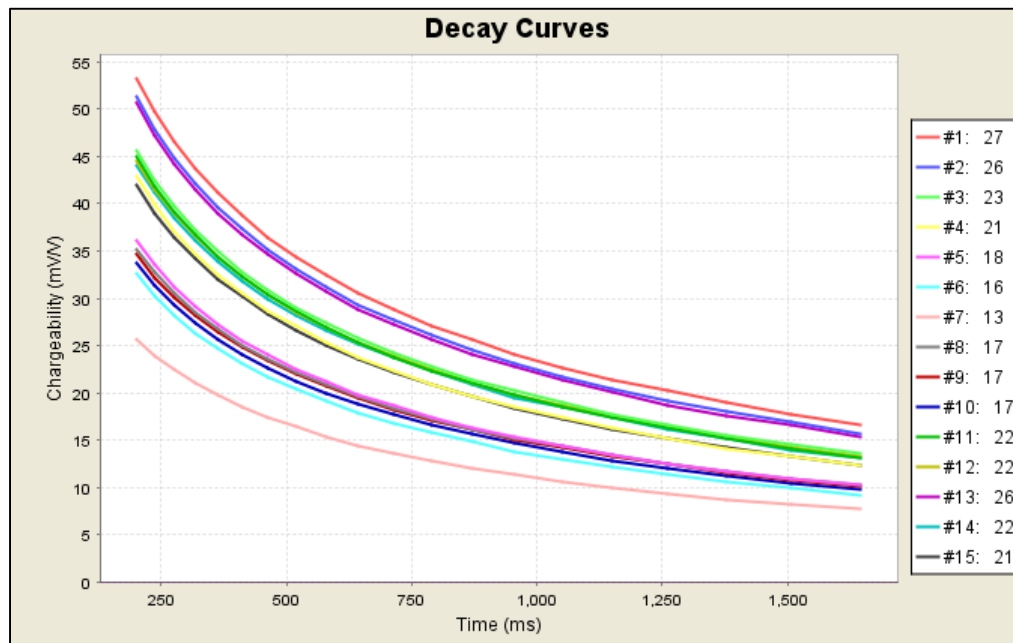


**Calidad de Datos.**

Los datos recolectados en el proyecto La Buena, malla La Julia fueron de muy buena calidad. Los voltajes primarios  $V_p$  para la mayor parte de la malla fueron suficientemente fuertes y las señales y curvas de decaimiento son suficientemente limpias en su mayoría. La figura 3.5 y 3.6 muestra datos de la parte sur del proyecto, para la modalidad 2D y 3D, respectivamente..



**Figura 3. 4** Curvas de Decaimiento de la línea 700E, estación de corriente 2650N, 2DIP Etapa 1



**Figura 3. 5** Curvas de Decaimiento de la línea de potencial 1100E, línea de corriente 1300E, estación de corriente 2900N, 3DIP Etapa 1.

### III. 3 Etapa 2.

Para esta segunda etapa de exploración geofísica se realizó un estudio en 3D utilizando dipolos de potencial de 50m con una separación entre líneas de 100m para tener una mayor resolución en los datos (Figura 3.7).

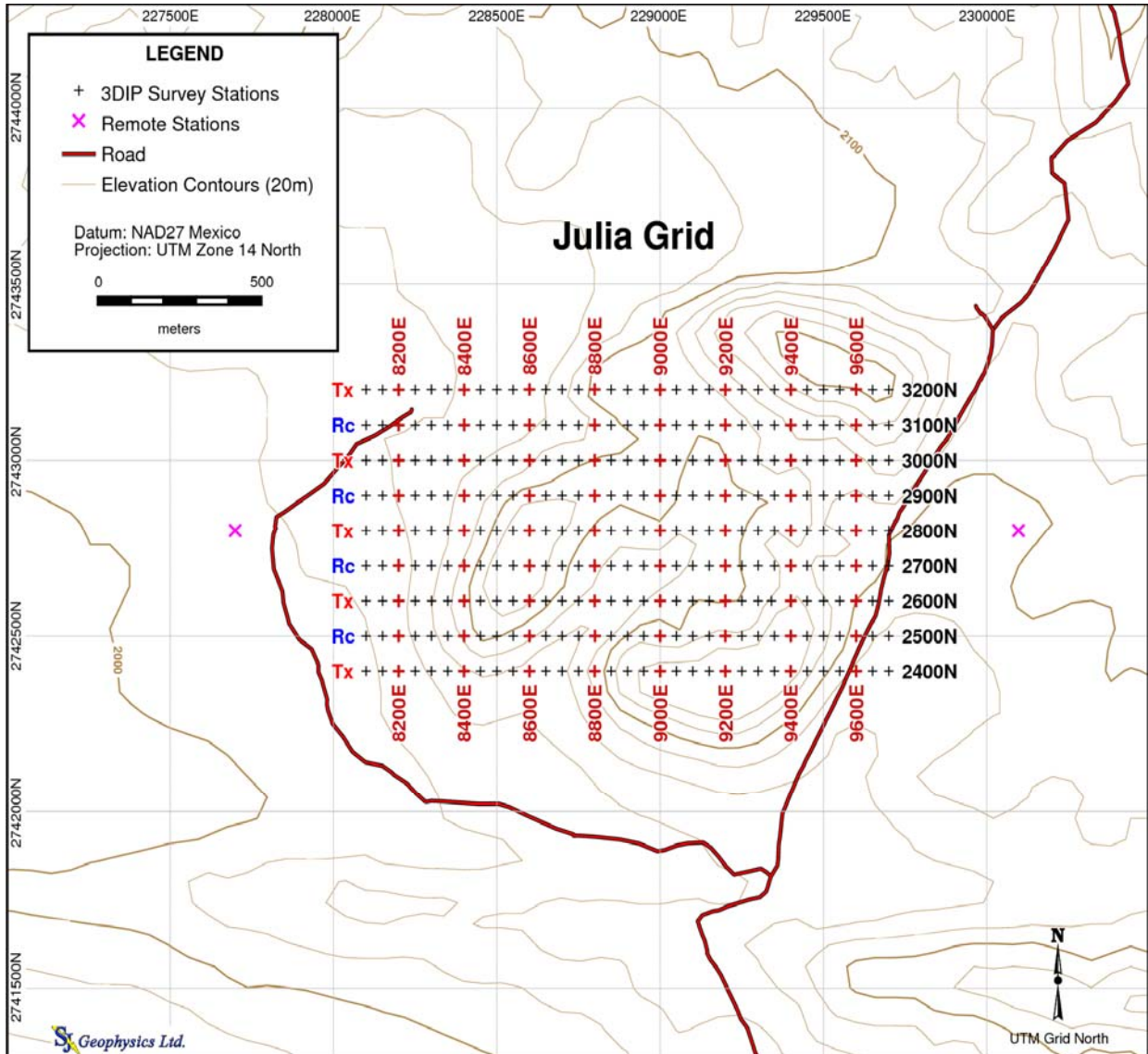


Figura 3. 6 Malla La Julia, Etapa

**Resumen del estudio:**

SJ Geophysics Ltd. realizó una segunda etapa para adquirir datos geofísicos en la propiedad La Buena. La siguiente tabla resume brevemente el estudio realizado durante la etapa 2:

Cliente	San Marco Resources Inc.
Nombre del Proyecto	La Buena
Localización	<i>Latitud: N24° 46' Longitud: W101° 40'</i> 2742000N 230500E UTM NAD27 México Zona 14
Tipo de Estudio	Polarización Inducida 3D (3DIP)
Total de Kilómetros Lineales	3DIP: 14.4 Km.
Fechas de Producción	Julio 24 – Agosto 2, 2011.
Objetivo	SJ Geophysics Ltd. fue contratado para realizar estudios de 3DIP con el propósito de complementar la etapa previa de exploración geofísica, y proveer modelos invertidos en 3D de resistividad y cargabilidad para esta zona.

**Tabla 6 Resumen de la etapa 1, Proyecto La Buena, Malla La Julia**

El equipo de trabajo desarrolló el estudio 3DIP entre Julio 24 y Agosto 2 de 2011, con la intención de progresar de Norte a Sur trabajando con tres líneas simultáneamente a partir de la línea 3200N a la 2400N. Se comenzó a trabajar con las líneas 3200N, 3100N y 3000N utilizando la primera y la última como líneas de corriente y la intermedia como línea de potencial. Las estaciones de corriente fueron situadas cada 50m a lo largo de las líneas de corriente. Los dipolos de potencial eran de 50m teniendo arreglos de 15-16 dipolos usando dos equipos de adquisición simultáneamente dándole un arreglo conjunto de hasta 32 dipolos, los receptores se ubicaban a la mitad de su arreglo cada uno, el primero en la estación 8500E y el segundo en la estación 9300E y las líneas de corriente comenzaban en la estación 8100E hasta concluir en la estación 9700E tomando una lectura para cada línea cada 50m (Cervantes y Sawall, 2011).

**Información de la Malla**

El área bajo estudio (malla La Julia) consistió en nueve líneas equiespaciadas a 100 m (Figura 3.5). Esta malla consistió en cuatro líneas de receptor (Rx) y cinco líneas de transmisor (Tx). Las líneas se nombraron 3200N a 2400N. Todas las líneas fueron orientadas este-oeste y su

longitud fue 1.6 Km. (Apéndice B). Las estaciones fueron marcadas con una estaca de madera cada 50m y se etiquetaron de la estación 8100E a la 9700E, utilizando los últimos cuatro dígitos de la coordenada Este UTM

Malla	La Julia
Número de líneas estudiadas	3DIP: 9
Azimut de las líneas	90°
Espaciamiento entre líneas	100m
Espaciamiento entre estaciones	50m
Rango de elevaciones (m. s. n. m.)	2021 – 2221m

**Tabla 7 Parámetros de la Malla, etapa 2.**

En el tiempo que duro el estudio, ocurrieron algunos problemas logísticos. Innumerables rupturas en los alambres de corriente y los cables de receptor retrasaban el estudio, dichas rupturas normalmente eran realizadas por el ganado existente en la zona. En ocasiones la topografía del lugar limitaba la comunicación entre el equipo de trabajo, pero se resolvía posicionando ayudantes en algún lugar donde pudiera tener contacto con las diferentes partes del equipo haciendo puente entre ellos

#### ***Parámetros del estudio e instrumentación***

Durante la segunda etapa, el estudio 3DIP fue llevado a cabo con el arreglo polo – dipolo convencional utilizando 15-16 dipolos de potencial de 50m de separación para un receptor, usando dos receptores simultáneamente (conexión en serie) el arreglo se ampliaba hasta a 32 dipolos, para un arreglo total de 1600m (Tabla 6). Las estaciones de inyección de corriente comenzaron en la estación 8100E y terminaron en la estación 9700E tomando una lectura para cada línea de corriente cada 50m. Las siguientes líneas de potencial se continuaron tomando con dos líneas de corriente, de este modo la línea intermedia entre cada línea de potencial era empalmada.

Parámetros 3D	
Tipo de arreglo	Offset Polo - Dipolo
Numero de Dipolos	16 - 32
Longitud de los dipolos	50m
Longitud del Arreglo	1600m
Intervalos de Corriente	50m a cada lado de la línea de potencial
Transmisor de PI	GDD TxII (No. Serie: 303)
Ciclo de trabajo	50%
Forma de Onda	Cuadrada
Ciclo y Periodo	2 seg ON / 2 seg OFF; 8 segundos.
Receptor de PI	SJ-24 Full Waveform Digital Receiver
Tiempo de Adquisición	Mínimo 60 segundos
Retraso Vp, Integración Vp	1200 ms, 600 ms
Retraso Mx, # de Ventanas Amplitud (Integración Mx)	200 ms, 20  36, 39, 42, 45, 48, 52, 56, 60, 65, 70, 75, 81, 87, 94, 101, 109,118, 128, 140, 154 (200 ms – 1800 ms)
Propiedades calculadas	Vp, Mx, Sp, Res aparente
GPS	Garmin GPSmap 60CSx
Precisión promedio	3 m
Proyección / Datum	NAD27 México Zona 14

**Tabla 8 Parámetros de los Instrumentos**

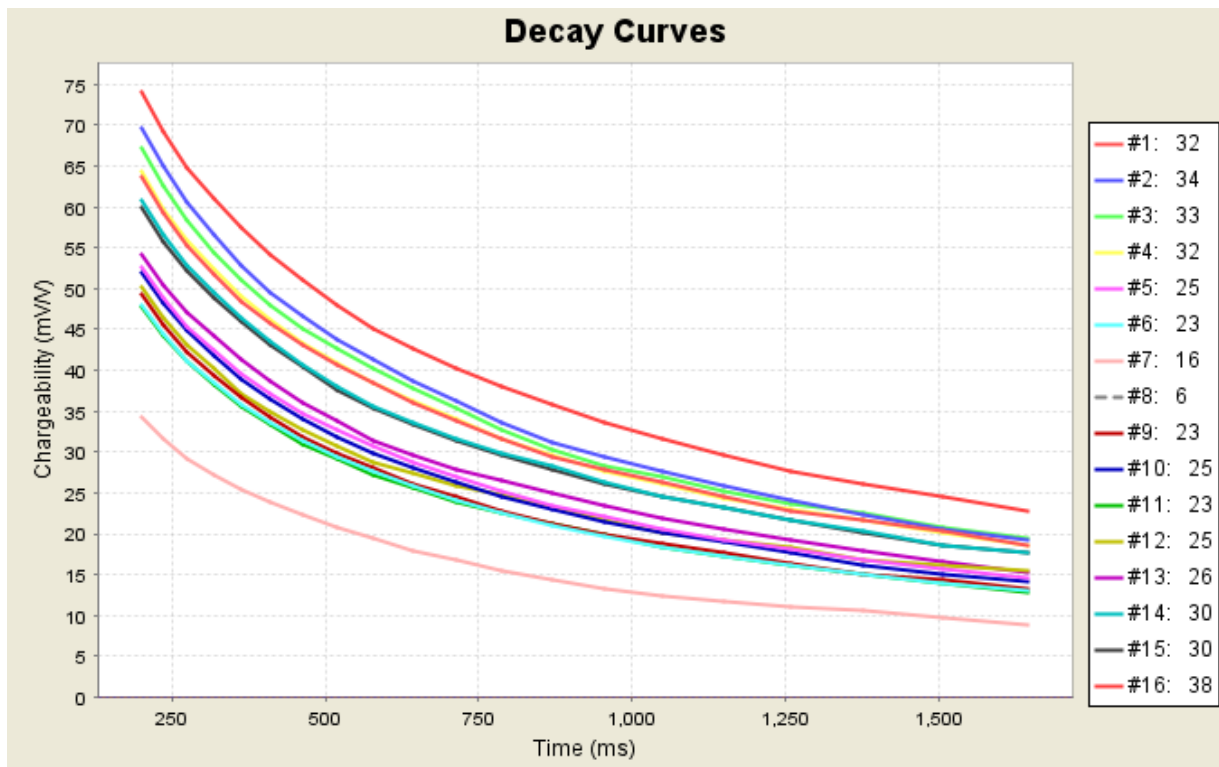
Durante la segunda etapa, el estudio 3DIP fue llevado a cabo con el arreglo Offset polo – dipolo utilizando 15-16 dipolos de potencial de 50m de separación para un receptor, usando dos receptores simultáneamente (conexión en serie) el arreglo se ampliaba hasta a 32 dipolos, para un arreglo total de 1600m (Tabla 6). Las estaciones de inyección de corriente comenzaron en la estación 8100E y terminaron en la estación 9700E tomando una lectura para cada línea de corriente cada 50m. Las siguientes líneas de potencial se continuaron tomando con dos líneas de corriente, de este modo la línea intermedia entre cada línea de potencial era empalmada.

Todos los datos fueron recolectados utilizando el sistema de SJ Geophysics Ltd SJ-24 Full Waveform para el receptor. La corriente fue inyectada en el subsuelo con un ciclo de trabajo de 2 segundos encendido, 2 segundo apagado por un transmisor marca GDD modelo TxII IP Serie 303. El arreglo de potencial fue implementado usando los cables de IP especializados de 8 conductores configurados con salidas a 50m para conectar los electrodos de potencial. En

cada estación de corriente, los electrodos consisten en tres barras de acero inoxidable de 1m de largo y 15mm de diámetro. Para la línea de potencial, los electrodos eran barras de acero inoxidable de 50cm de largo por 10mm de diámetro que eran enterrados casi en su totalidad hasta que tuvieran un contacto firme con el suelo. La localización de los remotos de corriente consistieron en cuatro barras de acero inoxidable de 1m de largo y 15mm de diámetro. La localización de estos remotos fueron adquiridos utilizando el GPS Garmin 60CSx para uso de los cálculos geofísicos (Apéndice B).

**Calidad de Datos.**

En la etapa 2, los datos recolectados fueron de buena calidad. La mayor parte de la malla presentó buena respuesta a la señal transmitida, ocasionando voltajes primarios  $V_p$  lo suficientemente fuertes. Las curvas de decaimiento se obtuvieron libres de ruido. La figura 3.8 muestra un ejemplo de los datos recolectados en esta etapa.

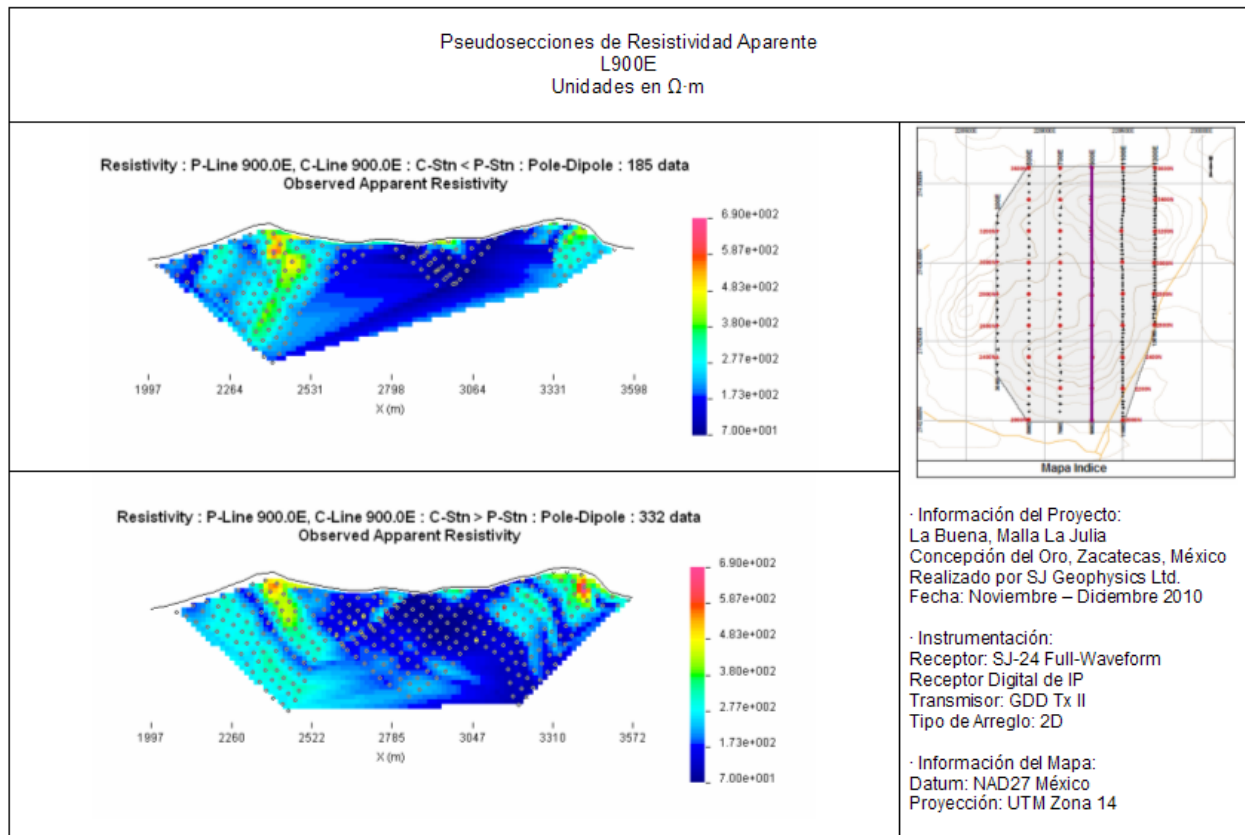
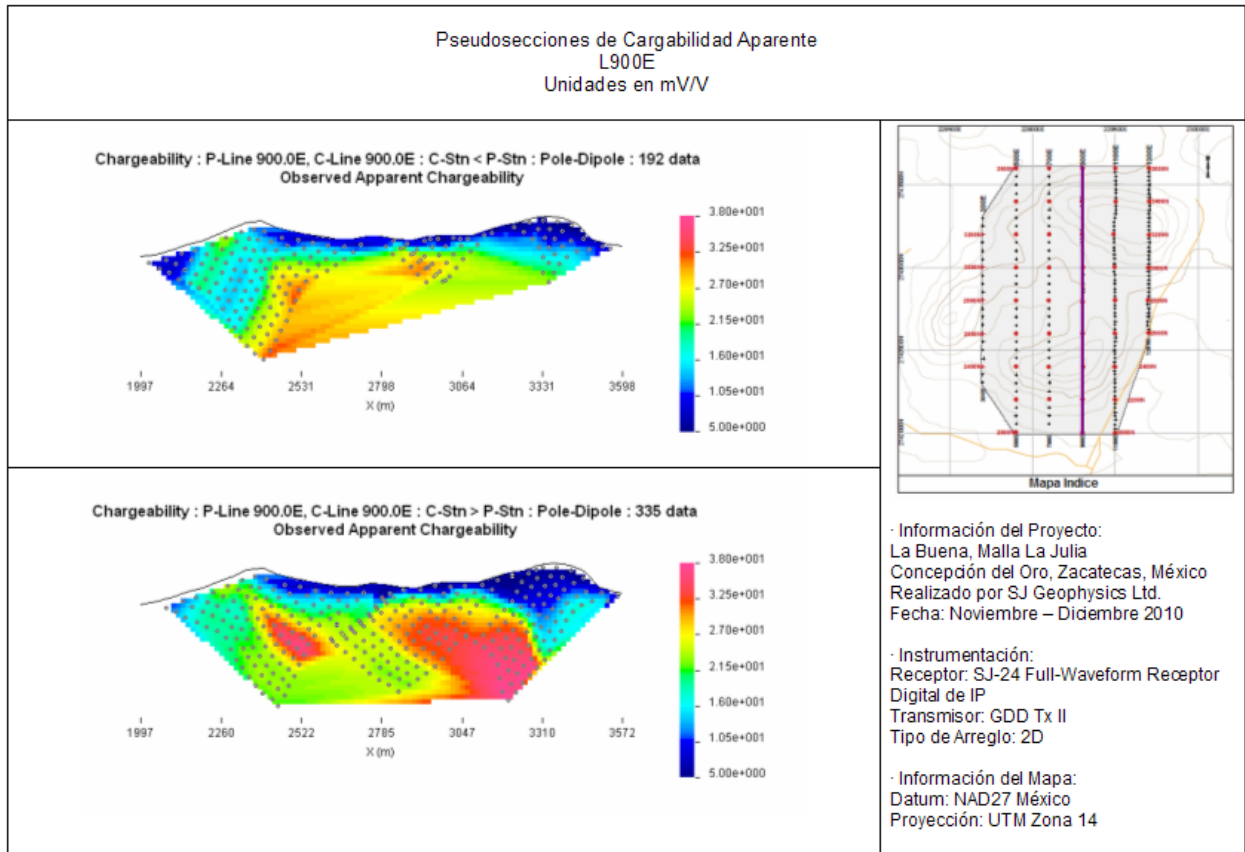


**Figura 3. 7 Curvas de Decaimiento de la línea de potencial 2700N, línea de corriente 2800N, estación de corriente 9250E, 3DIP Etapa 2**

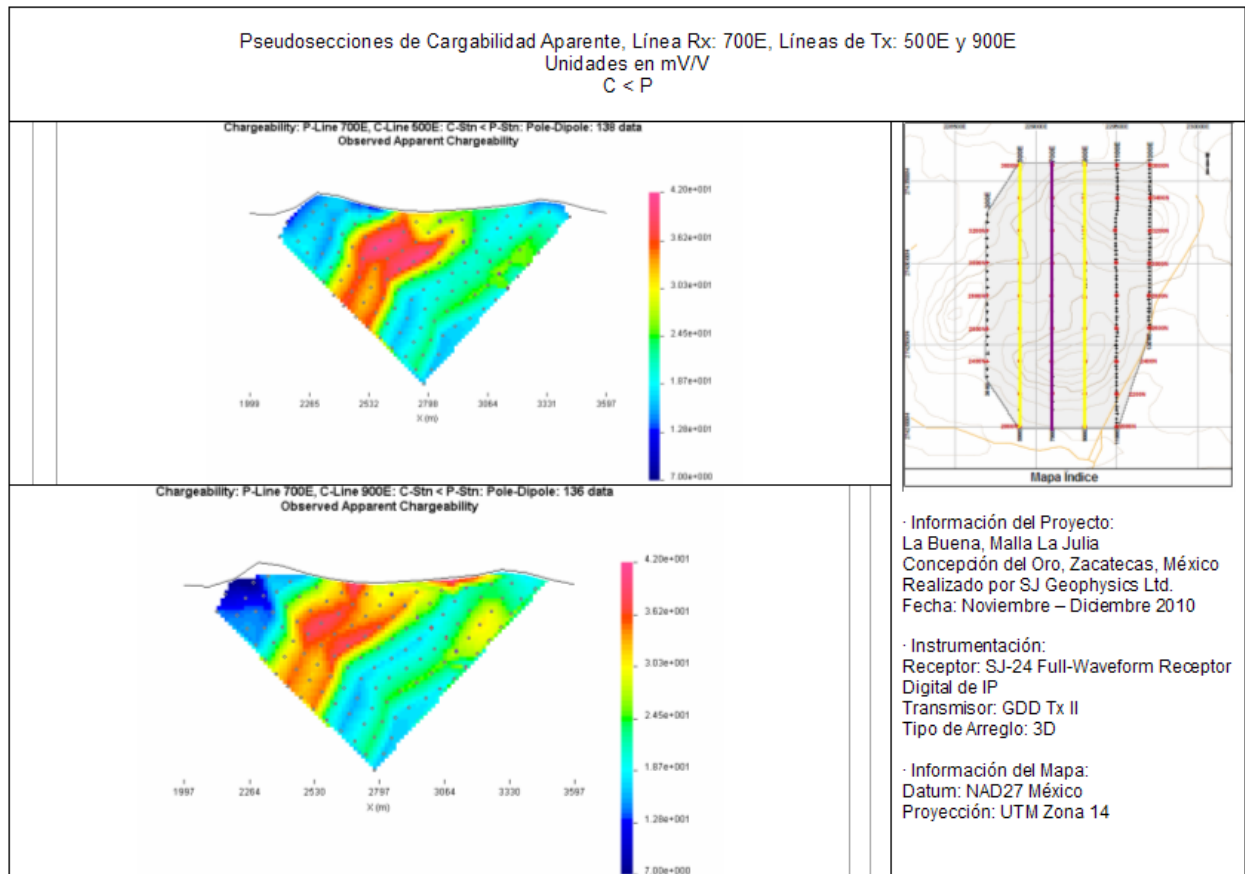
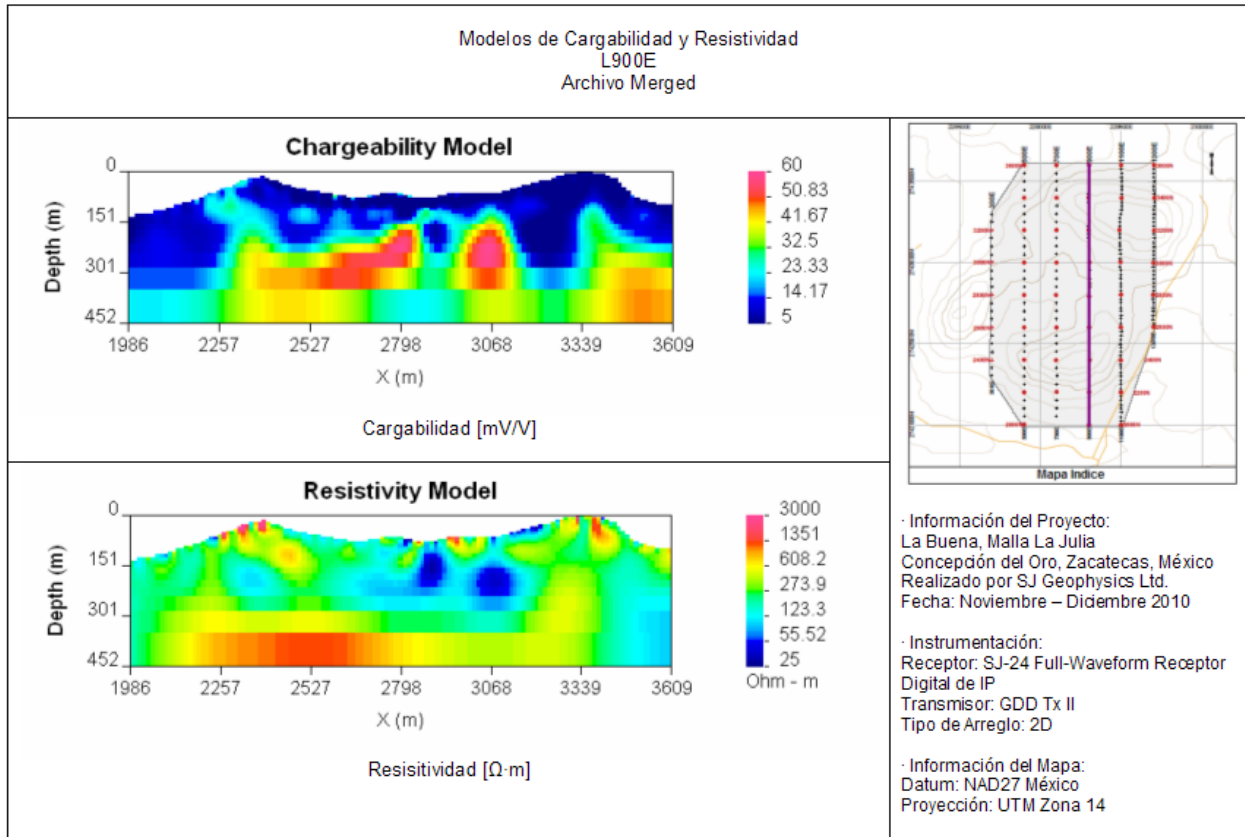
### III.4 Pseudosecciones y Modelos 2D.

Se realizaron pseudosecciones de cargabilidad aparente y resistividad aparente para ambas etapas del proyecto, se eligieron las líneas más representativas en ambos casos: para la línea 900E con datos de IP2D, y para las líneas de corriente 500E y 900E para la línea de potencial 700E a partir de los datos de 3DIP, así mismo como para las líneas 2600N y 2800N en la línea de potencial 2700N; todas las pseudosecciones en cada caso se presentan para los archivos  $C < P$  y  $C > P$ . Se incluye también el modelo de cargabilidad y resistividad obtenido de la inversión de datos 2D de la línea 900E como apoyo para referenciar las anomalías aparentes. Al revisar la pseudosección de la línea 900E cuando  $C < P$  se puede notar que la densidad de datos es mayor de lado derecho, esto es debido a la forma en la cual se capturaron los datos, se comenzó a trabajar por el lado norte de la línea teniendo un arreglo de potencial de 16 dipolos y cerrando el polo de corriente con el remoto que se encontraba 1000 m fuera de la línea en el sur; el punto de inyección de corriente se detuvo en la mitad de dicho arreglo de potencial (estación 3225N) para hacer un cambio en el arreglo y tener 16 dipolos frente a la corriente nuevamente, de esta manera se avanzó hasta la mitad otra vez y se cambio el arreglo de potencial para terminar de cubrir la línea, así el ultimo arreglo se cubrió en su totalidad obteniendo una mayor densidad de datos en la parte sur de la línea.

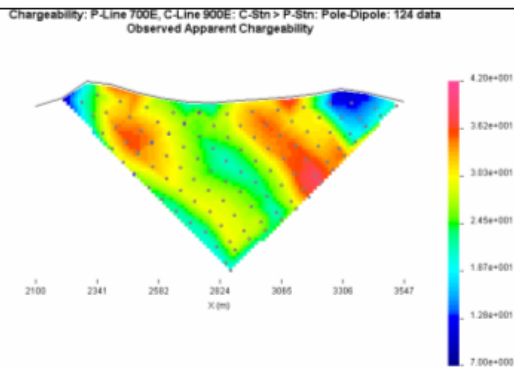
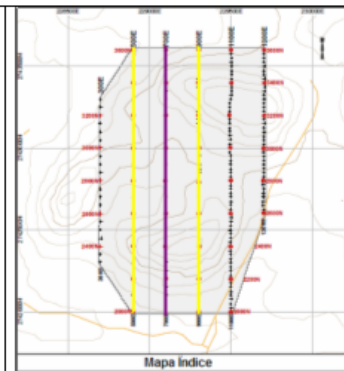
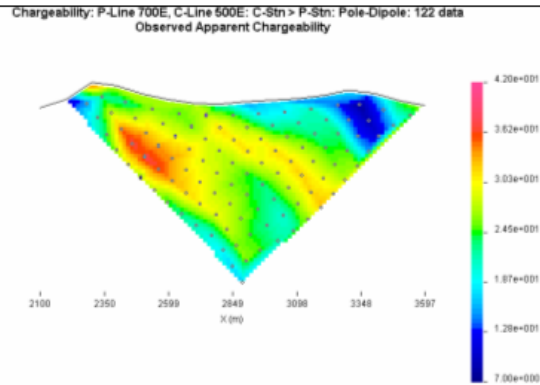
En general, al correlacionar las anomalías de cargabilidad y resistividad aparentes para ambas etapas del proyecto se puede notar que las zonas de bajos resistivos corresponden a las zonas de alta cargabilidad, en específico, el área de mayor correspondencia se encuentra en la parte central de las líneas mostradas de la primera etapa, y al Este en el caso de la segunda etapa. Basándose en la información que el cliente autorizó para la realización de este reporte, dicha zona de correspondencia entre cargabilidades altas y bajos resistivos puede coincidir con una región de rocas mineralizadas de la Formación Caracol. La zona de altos resistivos al norte de las líneas de la primera etapa coincide con la falla mapeada previamente en la superficie. En el caso de la segunda etapa, al Oeste de las líneas, la zona de altos resistivos puede coincidir con los afloramientos monzoníticos de la zona.





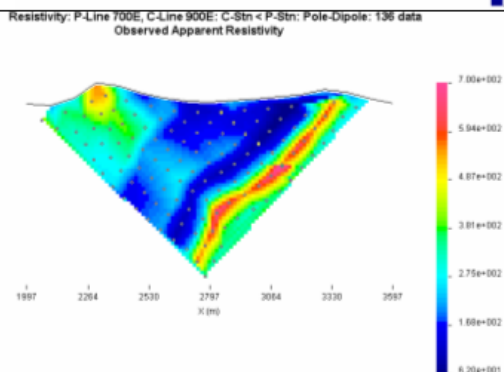
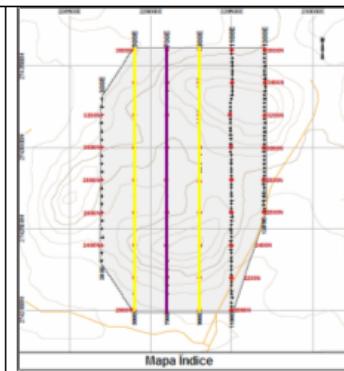
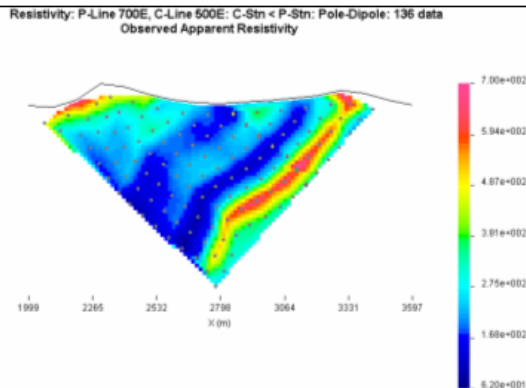


Pseudosecciones de Cargabilidad Aparente, Línea Rx: 700E, Líneas de Tx: 500E y 900E  
 Unidades en mV/V  
 $C > P$



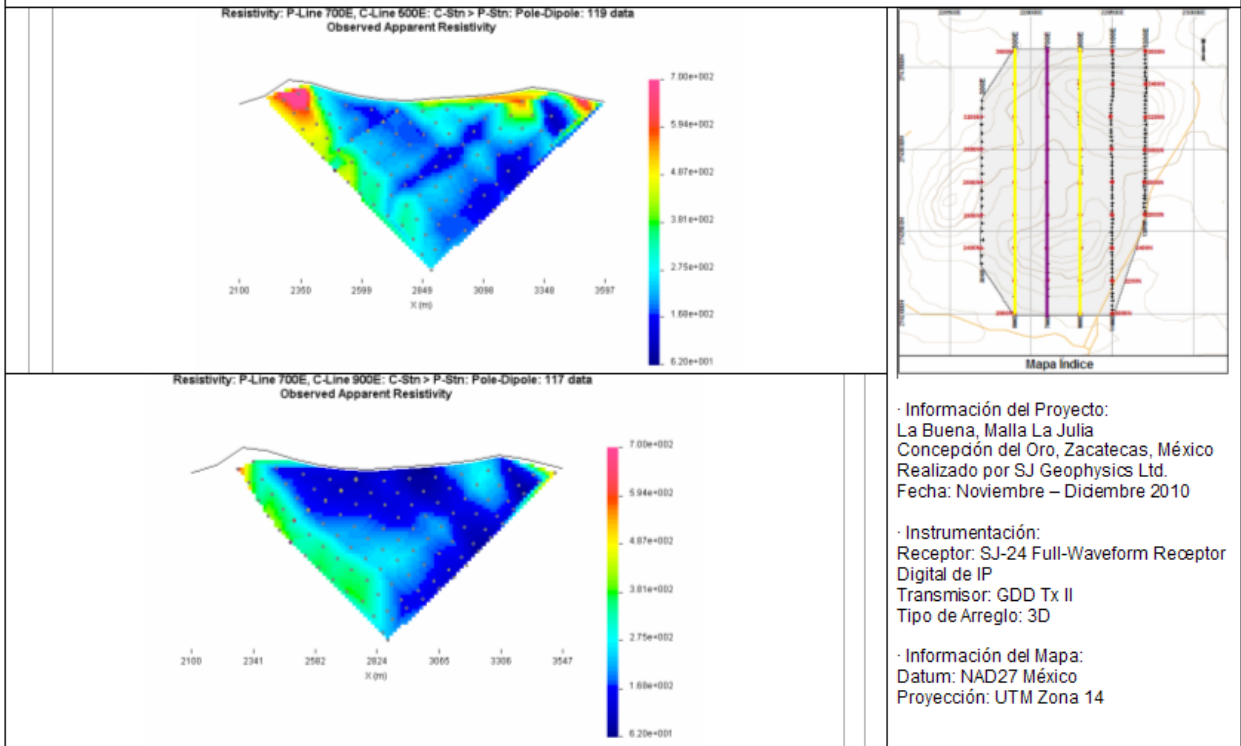
- Información del Proyecto:  
 La Buena, Malla La Julia  
 Concepción del Oro, Zacatecas, México  
 Realizado por SJ Geophysics Ltd.  
 Fecha: Noviembre – Diciembre 2010
- Instrumentación:  
 Receptor: SJ-24 Full-Waveform Receptor Digital de IP  
 Transmisor: GDD Tx II  
 Tipo de Arreglo: 3D
- Información del Mapa:  
 Datum: NAD27 México  
 Proyección: UTM Zona 14

Pseudosecciones de Resistividad Aparente, Línea Rx: 700E, Líneas de Tx: 500E y 900E  
 Unidades en  $\Omega \cdot m$   
 $C < P$

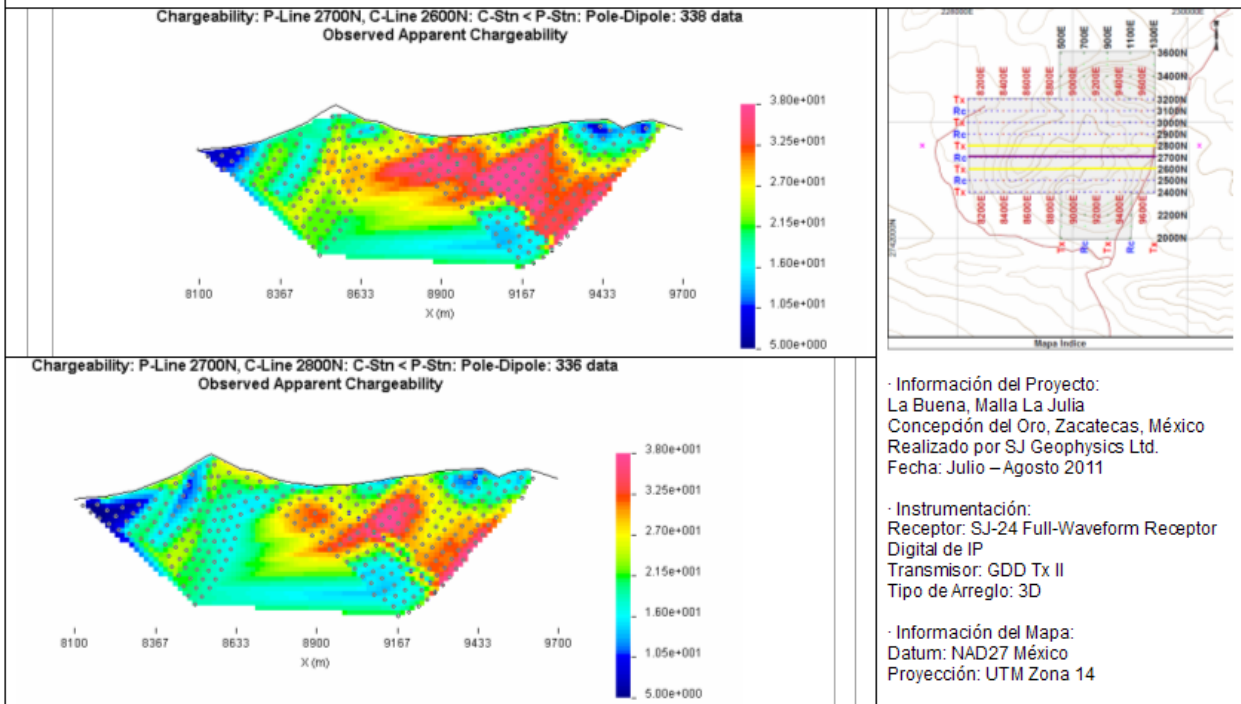


- Información del Proyecto:  
 La Buena, Malla La Julia  
 Concepción del Oro, Zacatecas, México  
 Realizado por SJ Geophysics Ltd.  
 Fecha: Noviembre – Diciembre 2010
- Instrumentación:  
 Receptor: SJ-24 Full-Waveform Receptor Digital de IP  
 Transmisor: GDD Tx II  
 Tipo de Arreglo: 3D
- Información del Mapa:  
 Datum: NAD27 México  
 Proyección: UTM Zona 14

Pseudosecciones de Resistividad Aparente, Línea Rx: 700E, Líneas de Tx: 500E y 900E  
 Unidades en  $\Omega \cdot m$   
 C > P

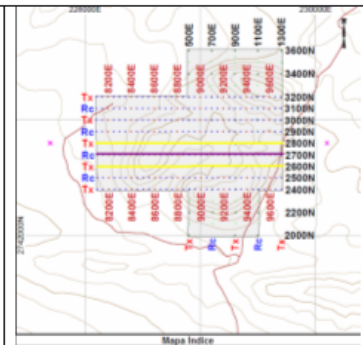
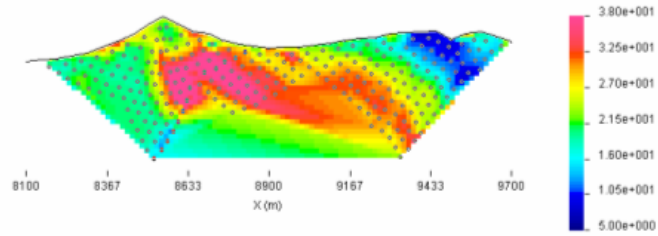


Pseudosecciones de Cargabilidad Aparente, Línea Rx: 2700N, Líneas de Tx: 2600N y 2800N  
 Unidades en mV/V  
 C < P

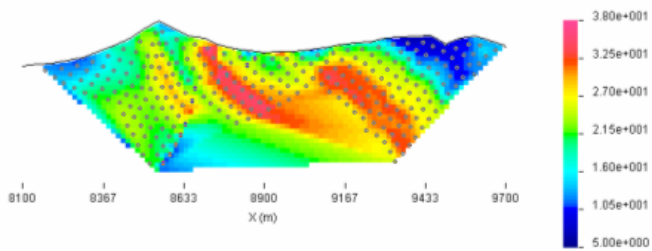


Pseudosecciones de Cargabilidad Aparente, Línea Rx: 2700N, Líneas de Tx: 2600N y 2800N  
 Unidades en mV/V  
 $C > P$

Chargeability: P-Line 2700N, C-Line 2600N: C-Stn > P-Stn: Pole-Dipole: 303 data  
 Observed Apparent Chargeability



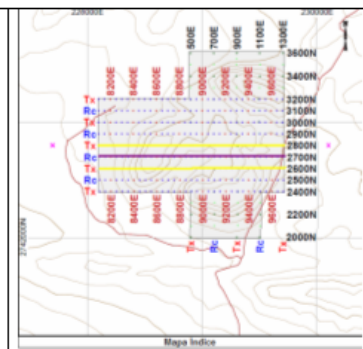
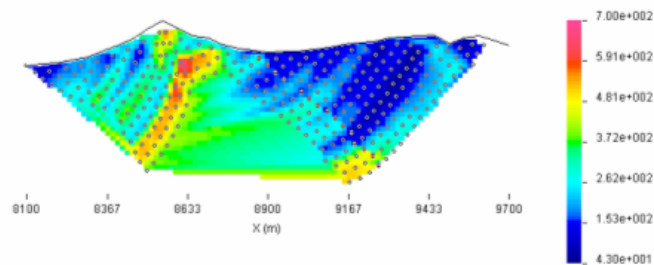
Chargeability: P-Line 2700N, C-Line 2800N: C-Stn > P-Stn: Pole-Dipole: 324 data  
 Observed Apparent Chargeability



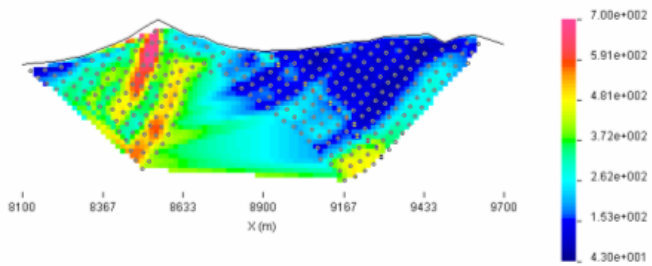
- Información del Proyecto:  
 La Buena, Malla La Julia  
 Concepción del Oro, Zacatecas, México  
 Realizado por SJ Geophysics Ltd.  
 Fecha: Julio – Agosto 2011
- Instrumentación:  
 Receptor: SJ-24 Full-Waveform Receptor  
 Digital de IP  
 Transmisor: GDD Tx II  
 Tipo de Arreglo: 3D
- Información del Mapa:  
 Datum: NAD27 México  
 Proyección: UTM Zona 14

Pseudosecciones de Resistividad Aparente, Línea Rx: 2700N, Líneas de Tx: 2600N y 2800N  
 Unidades en  $\Omega \cdot m$   
 $C < P$

Resistivity: P-Line 2700N, C-Line 2600N: C-Stn < P-Stn: Pole-Dipole: 332 data  
 Observed Apparent Resistivity



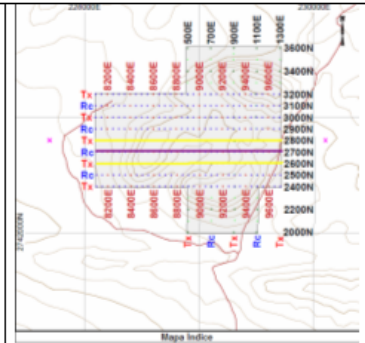
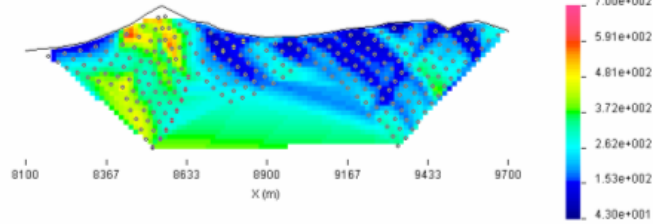
Resistivity: P-Line 2700N, C-Line 2800N: C-Stn < P-Stn: Pole-Dipole: 323 data  
 Observed Apparent Resistivity



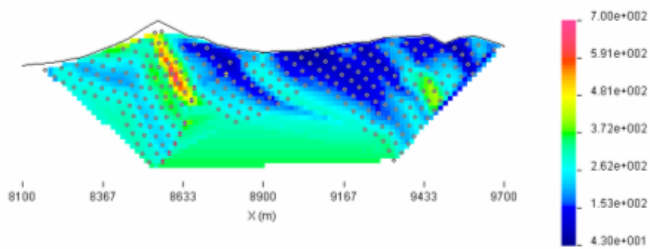
- Información del Proyecto:  
 La Buena, Malla La Julia  
 Concepción del Oro, Zacatecas, México  
 Realizado por SJ Geophysics Ltd.  
 Fecha: Julio – Agosto 2011
- Instrumentación:  
 Receptor: SJ-24 Full-Waveform Receptor  
 Digital de IP  
 Transmisor: GDD Tx II  
 Tipo de Arreglo: 3D
- Información del Mapa:  
 Datum: NAD27 México  
 Proyección: UTM Zona 14

Pseudosecciones de Resistividad Aparente, Línea Rx: 2700N, Líneas de Tx: 2600N y 2800N  
 Unidades en  $\Omega \cdot m$   
 C > P

Resistivity: P-Line 2700N, C-Line 2600N: C-Stn > P-Stn: Pole-Dipole: 289 data  
 Observed Apparent Resistivity



Resistivity: P-Line 2700N, C-Line 2800N: C-Stn > P-Stn: Pole-Dipole: 302 data  
 Observed Apparent Resistivity



- Información del Proyecto:  
 La Buena, Malla La Julia  
 Concepción del Oro, Zacatecas, México  
 Realizado por SJ Geophysics Ltd.  
 Fecha: Julio – Agosto 2011

- Instrumentación:  
 Receptor: SJ-24 Full-Waveform Receptor  
 Digital de IP  
 Transmisor: GDD Tx II  
 Tipo de Arreglo: 3D

- Información del Mapa:  
 Datum: NAD27 México  
 Proyección: UTM Zona 14

**Apéndice A. Tablas de resumen 2D y 3D IP, etapa 1.**

<b>Malla La Buena 2DIP</b>				
<b>línea</b>	<b>Serie de la línea</b>	<b>Estación inicial</b>	<b>Estación final</b>	<b>Longitud estudiada (m)</b>
300	E	2300	3300	1000
500	E	2000	3600	1600
700	E	2050	3600	1550
900	E	2000	3600	1600
1100	E	2000	3600	1600
1300	E	2600	3600	1600

Total de metros lineales = 8350

**Remotos par la malla La Julia 2DIP, etapa 1:**

<b>La Julia 2DIP, Remotos</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Este – NAD27Mex 14R</b>	<b>Norte – NAD27Mex 14R</b>
Rem1: 400E, 1000N	228803	2741001
Rem2: 800E, 1000N	229201	2740995
Rem3: 1200E, 1000N	229600	2740997

<b>Malla La Buena 3DIP</b>					
<b>línea</b>	<b>Tipo</b>	<b>Serie de la línea</b>	<b>Estación inicial</b>	<b>Estación final</b>	<b>Longitud estudiada (m)</b>
500	Tx	E	2000	3600	1600
700	Rx	E	2050	3600	1550
900	Tx	E	2000	3600	1600
1100	Rx	E	2000	3600	1600
1300	Tx	E	2600	3600	1600

Total de metros lineales = 7350

**Remotos par la malla La Julia 3DIP, etapa 1:**

<b>La Julia 3DIP, Remotos</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Este – NAD27Mex 14R</b>	<b>Norte – NAD27Mex 14R</b>
Norte: 901E, 4050N	229300	2744049
Sur: 800E, 1000N	229201	2740995

**Apéndice B. Tablas de resumen 3D IP, etapa 2.**

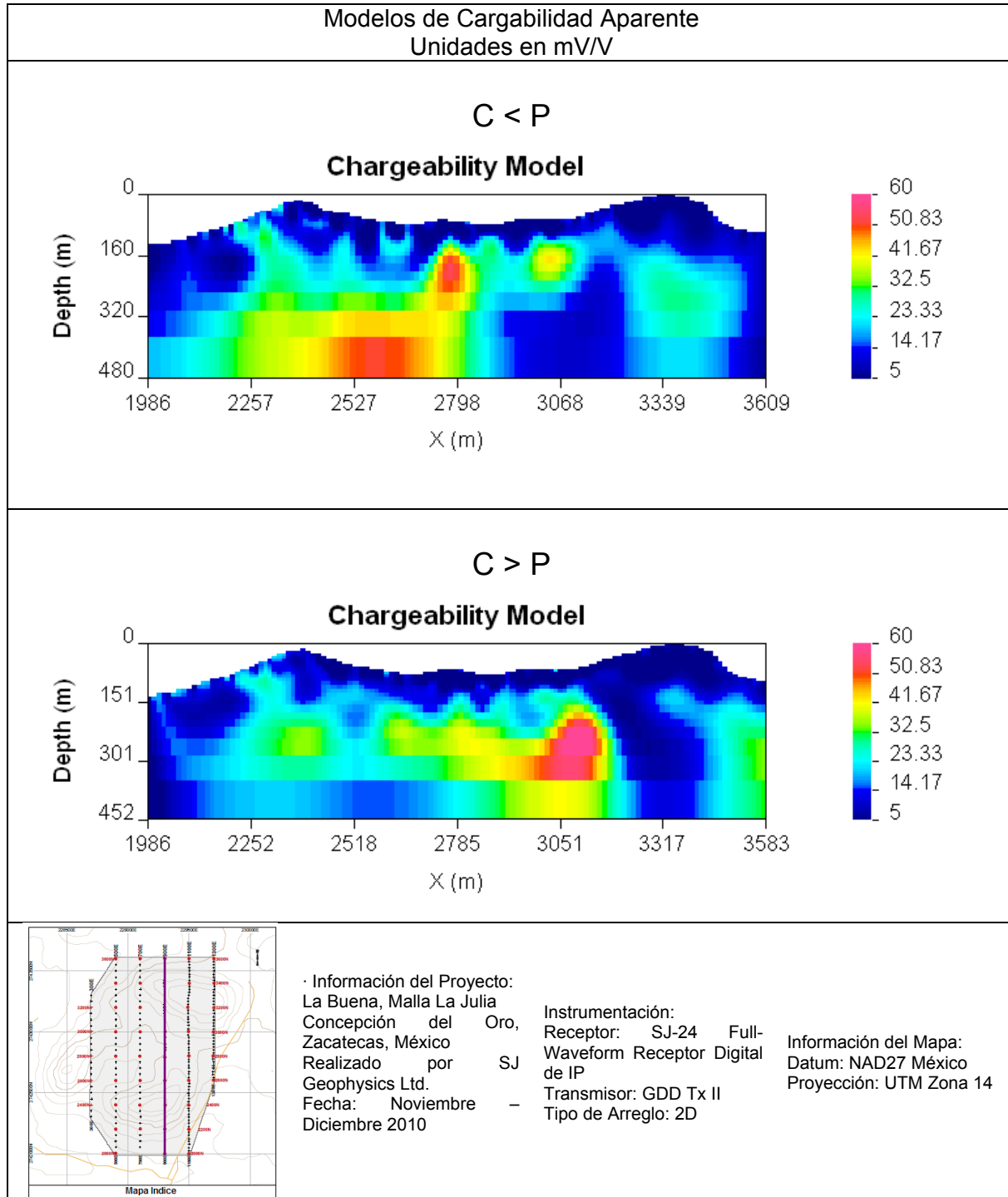
<b>Malla La Julia 3DIP</b>				
<b>Línea</b>	<b>Serie de la Línea</b>	<b>Estación inicial</b>	<b>Estación final</b>	<b>Longitud estudiada (m)</b>
2400	N	8100	9700	1600
2500	N	8100	9700	1600
2600	N	8100	9700	1600
2700	N	8100	9700	1600
2800	N	8100	9700	1600
2900	N	8100	9700	1600
3000	N	8100	9700	1600
3100	N	8100	9700	1600
3200	N	8100	9700	1600

Total de metros lineales = 14400

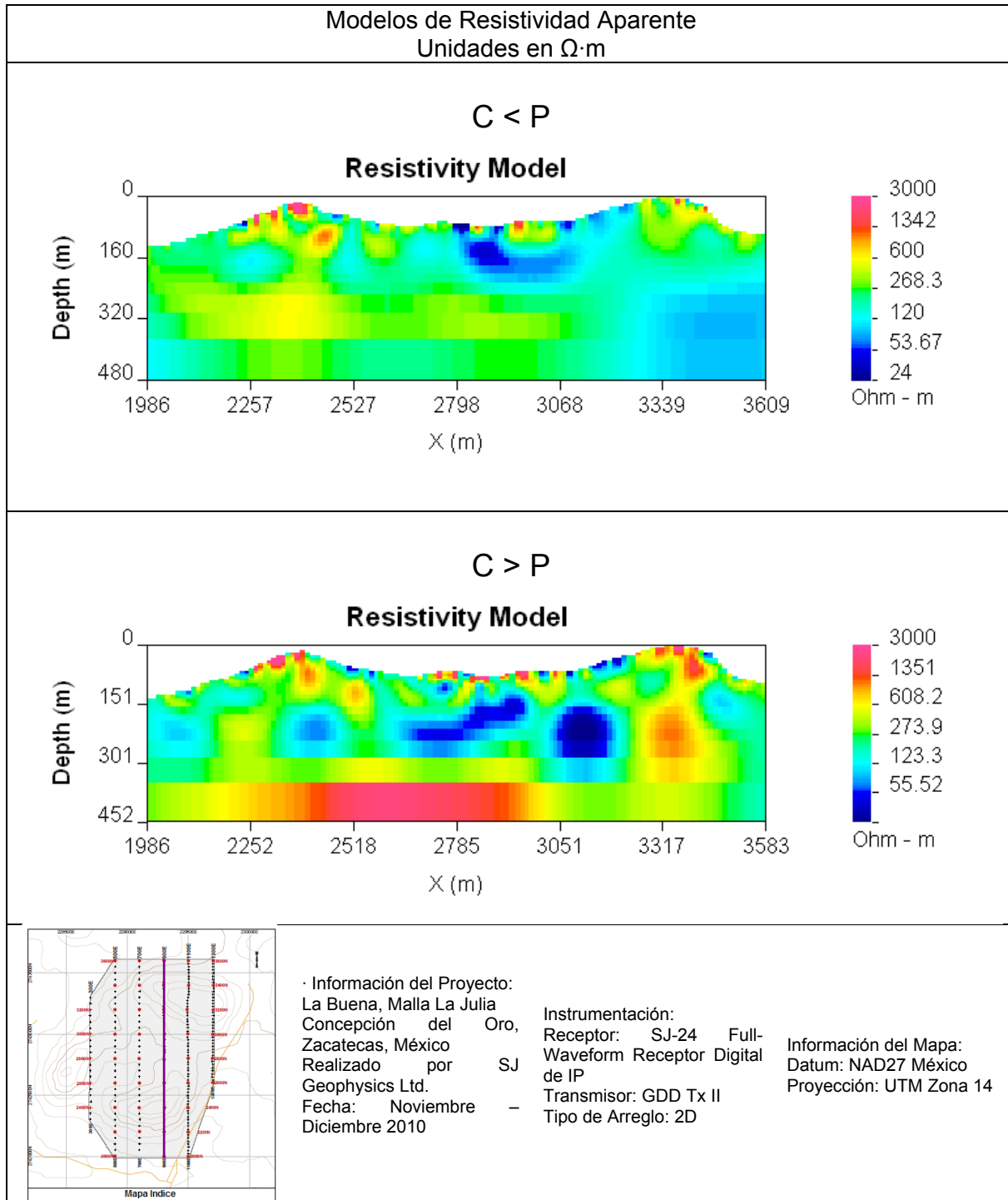
**Remotos par la malla La Julia 3DIP, etapa 2:**

<b>La Julia 3DIP, Remotos</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Este – NAD27Mex 14R</b>	<b>Norte – NAD27Mex 14R</b>
Oeste:	227699	2742800
Este:	230097	2742800

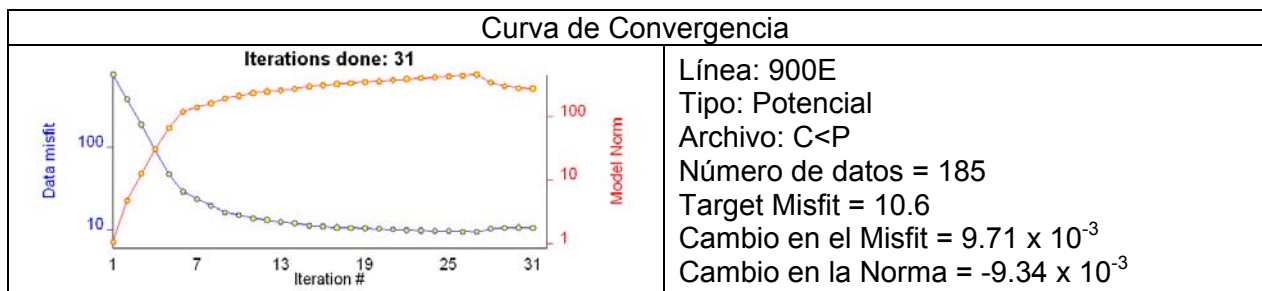
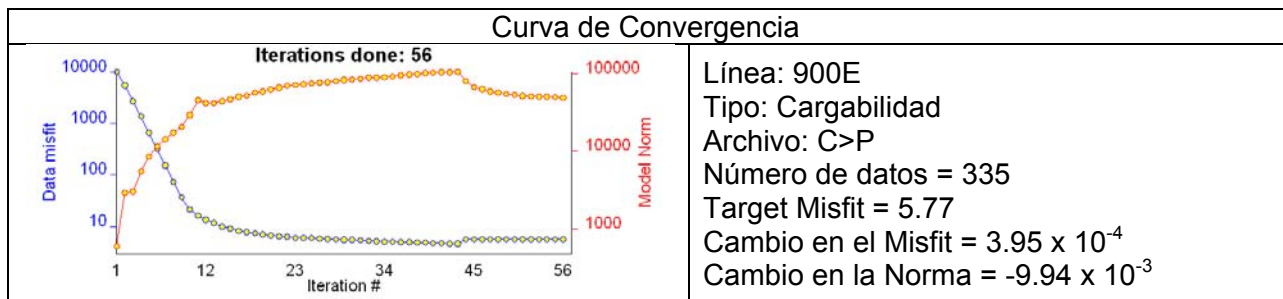
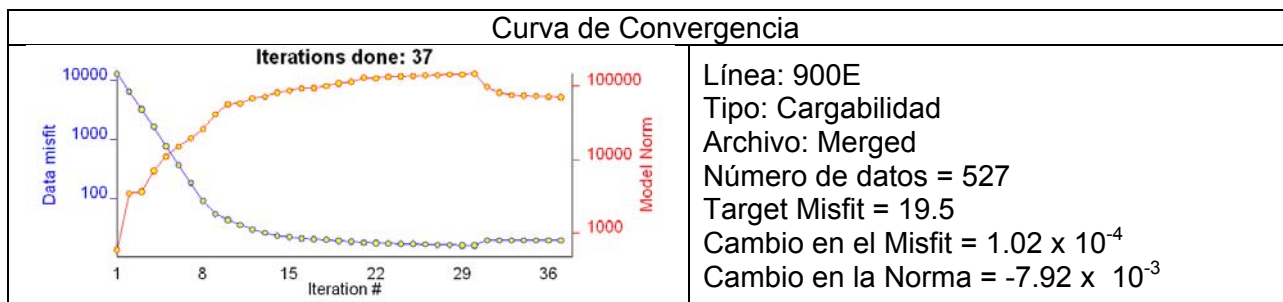
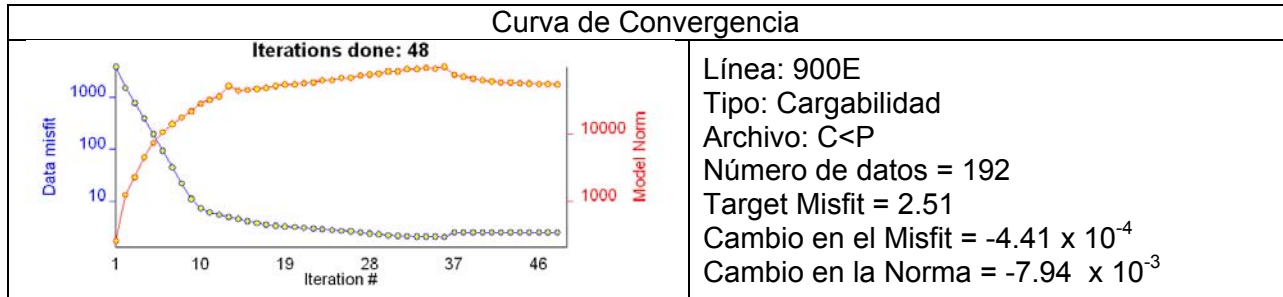
Apéndice C. Modelos 2D C<P y C>P, L900E.

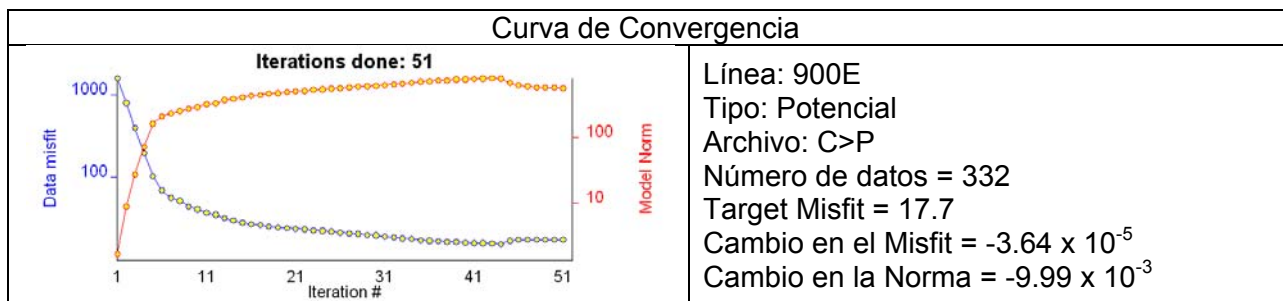
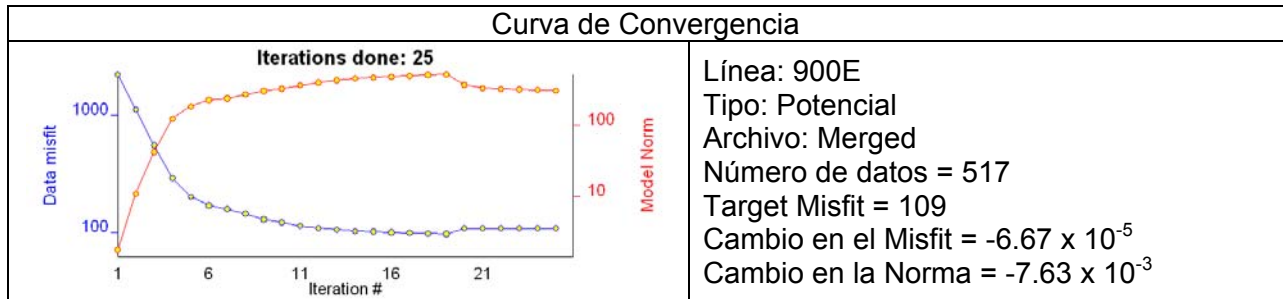






Apéndice D. Curvas de convergencia para modelos 2D.





## Bibliografía.

- CERVANTES-RICO, J. L. F. *Logistics Report For San Marco Resources Inc. 2D & 3D Induced Polarization on the La Buena Project*. 2010, SJ Geophysics Ltd.
- CERVANTES-RICO, J. L. F. y Sawall, M. *Logistics Report For San Marco Resources Inc. 2D & 3D Induced Polarization on the La Buena Project*. 2011, SJ Geophysics Ltd.
- CHEN, B. *JavIP Notes*. 2012, SJ Geophysics Ltd.
- DECEUSTER, J. y Kaufmann, O. *Improving the delineation of hydrocarbon-impacted soils and water through induced polarization (IP) tomographies: A field study at an industrial waste land*. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, 136, 25 – 42.
- DOBRIN, M. B. *Introducción a la prospección geofísica*. 1975, Omega.
- IAKUBOVSKII, V. y Liajov, L. *Exploración eléctrica*. 1980, Reverte.
- LI, Y. y Oldenburg, D. W. *3D Inversion of induced polarization data*. *Geophysics*, 65, 1931-1945.
- LOKE, M. H. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical Imaging surveys*. 2004.
- MENKE, W. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. 1989, Academic Press, Inc.
- MORGAN, L. A. *Geophysical Characteristics of Volcanogenic Massive Sulfide Deposits*. 2010, USGS.
- OLDENBURG, D. W. y Li, Y. *Inversion for applied geophysics: a tutorial*. Near-surface geophysics. SEG investigation in geophysics series No. 13, 89-158.
- OLDENBURG, D. W. y Li, Y. *Inversion of Induced polarization data*. *Geophysics*, 1994, 59, 1327-1341.
- OLDENBURG, D. W., McGillivray, P. R. y Ellis, R. G. *Generalized subspace methods for large-scale inverse problems*. *Geophysical Journal International*, 1993, 114, 12-20.
- OLDENBURG, W. D. y Pratt, D. A. *Geophysical Inversion for Mineral Exploration: a Decade of Progress in theory and Practice*. 2007, Geophysical Inversion Facility, University of British Columbia.
- ORELLANA, E. *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. 1982, Parainfo, España.
- RASTAD, S. *Geophysical Results on La Buena – Julia Zone Grid*. SJ Geophysics Ltd. / S. J. V. Consultants Ltd. 2010. 16p.
- RASTAD, S. y Witter, J. *Preliminary Interpretation Memo for La Buena Project*. SJ Geophysics Ltd. / S. J. V. Consultants Ltd. 2011. 17p.
- SCALES, J. A. y Snieder, R. *The Anatomy of Inverse Problem*. 2000, *Geophysics*, 65, 1708-1710.

SLATER, L. D. y Lesmes, D. *The Induced Polarization Method*. 2008.

SUMMER, J. *A compariso of electrode arrays in IP surveying*. 1972.

VAN SCHOOR, M. et all. *Comparison between time- and frequency-domain induced polarization parameters*. 2009, 11<sup>th</sup> SAGA Biennia Technical Meeting and Exhibition, Suiza.

ZHDANOV, M. S. *Geophysical Electromagnetic theory and Methods. Methods in Geochemistry and Geophysics*. Vol. 43, 2009, Elsevier.