



Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis de Grado en Geofísica

Identificación y caracterización de paleocauces mediante tomografías de resistividad eléctrica en Miraflores, Chaco

Autor: Macarena Amaya

Director: Dr. Santiago Perdomo

Co-Director: Dr. Luis Guarracino

La Plata
Diciembre de 2018

Resumen

En el año 2014 se dio inicio al proyecto “*Groundwater resources for small rural and Aboriginal communities in Chaco province, Argentina*”, financiado por el programa *Geoscientists Without Borders* de la *Society of Exploration Geophysicists*. La localidad de Miraflores y sus alrededores se encuentran gravemente afectados por la dificultad de acceso al agua. El proyecto buscó aportar a la mejora de la situación hídrica de la zona mediante la utilización de métodos geofísicos. En este contexto se enmarca el presente trabajo, siendo su objetivo principal la caracterización de geoformas que representan los sitios con mayor probabilidad de proveer agua dulce en la región (paleocauces) a través de tomografías de resistividad eléctrica.

La campaña de medición se realizó en el mes de mayo del año 2016 y se midieron un total de siete tomografías. Estos estudios se ubicaron principalmente en las comunidades aborígenes y rurales más afectadas.

El procesamiento fue realizado con el programa RES2DINV de Geotomo Software. Se obtuvieron ajustes con RMS (error medio cuadrático) porcentual del orden del 5%. El método permitió identificar correctamente los paleocauces a través de contrastes de resistividad en los modelos resultantes.

Los resultados fueron utilizados para la localización de perforaciones y posterior colocación de bombas manuales. La información obtenida en la descripción litológica y las mediciones de conductividad eléctrica permitieron una interpretación cualitativa de los rangos de resistividades de las tomografías. Se concluye que a futuro podría utilizarse el método como apoyo para la localización de nuevas perforaciones en la región.

Índice general

1. Introducción	9
1.1. Motivación	9
1.1.1. El Impenetrable Chaqueño y el acceso al agua	9
1.1.2. Geoscientist Without Borders (GWB)	12
1.2. Antecedentes	14
1.3. Objetivos	15
2. Área de estudio	16
2.1. Geología	16
2.2. Hidrogeología	18
2.3. Geomorfología	20
3. Marco teórico	21
3.1. Método eléctrico de prospección	21
3.2. Resistividad de las rocas	21
3.3. Ley de Ohm	23
3.4. Campo eléctrico en un medio continuo	24
3.5. Configuraciones electrónicas	26
3.6. Resistividad aparente y verdadera	27
3.7. Estudios geoelectricos en una dimensión	27
3.8. Planteo directo y problema inverso	28
3.9. Teoría de la inversión	28
3.10. Tomografías de resistividad eléctrica	30
3.11. Modelo de discretización del espacio y pseudosección	31
3.12. Sensibilidad de los arreglos de medición	32
4. Metodología	35
4.1. Campaña de reconocimiento geoelectrico	35
4.2. Instrumental	36
4.3. Planificación del trabajo de campo	37
4.4. Medición de las tomografías	37
4.4.1. Arreglo utilizado	40
4.5. Procesamiento	40
4.5.1. RES2DINV	40
4.5.1.1. Acondicionamiento del dato	41
4.5.1.2. Parámetros de inversión	42

5. Resultados	44
5.1. Resultados individuales	44
5.2. Consideraciones generales	53
6. Interpretación y análisis	56
6.1. Análisis individual de los resultados	57
6.2. Análisis general de los resultados	65
6.3. Perforaciones	66
7. Conclusiones	69

Índice de figuras

1.1.	Extensión de la región Chaco Seco. Extraída de Tiddi et al. (2014).	10
1.2.	Río Bermejo. Extraída de Tiddi et al. (2014).	10
1.3.	Ubicación de la Localidad de Miraflores, Chaco (Google Maps).	11
1.4.	Transporte de agua en carretas, desde Miraflores a la zona rural.	12
1.5.	Proyectos financiados por GWB en el mundo. Extraído de https://seg.org/About-SEG/Geoscientists-Without-Borders/Projects	13
1.6.	Relevamientos realizados en las primeras campañas en los alrededores de Miraflores, Chaco.	13
2.1.	Distribución de las provincias geológicas en Argentina. Extraído de Ramos (1999).	17
2.2.	Regiones Hidrogeológicas de la Argentina (Auge, 2004). Modificado de http://aquabook.agua.gob.ar/416_0 .	19
2.3.	Subdivisión según geomorfología del Impenetable chaqueño. Modificada de Bastera (2004)	20
3.1.	Cilindro conductor homogéneo.	22
3.2.	Rangos de variación de resistividad de rocas y minerales. Para las rocas, el extremo izquierdo del rango representa la saturación de agua y el derecho la ausencia de la misma. Modificado de Loke (2016).	23
3.3.	Circulación de corriente entre dos electrodos en un medio continuo, homogéneo e isótropo.	24
3.4.	Líneas de corriente generadas por un electrodo en un medio continuo, homogéneo e isótropo.	26
3.5.	Arreglos electródicos lineales más utilizados, con la expresión para el cálculo de la constante geométrica K. Extraído de Loke (2016).	27
3.6.	Esquema de inversión.	29
3.7.	Esquema de medición de tomografías. La secuencia de medición es para caso del arreglo Wenner (modificado de Loke, 2016).	31
3.8.	Pseudosección obtenida para distintos arreglos a partir del mismo modelo de resistividad del subsuelo planteado en la imagen e). Extraído de Loke (2016).	33
3.9.	Escenario para el cálculo de la derivada de Frechet.	34
4.1.	Sondeos eléctricos verticales dentro (B) y fuera (A y C) de un paleocauce (Google Earth). Modificado de Guarracino et al. (2018).	35
4.2.	Esquema del tendido.	36
4.3.	Diseño del tendido en el Paseo del Bosque, FCAG.	36
4.4.	Resistivímetro ARES con caja conmutadora.	37
4.5.	Localización de las tomografías realizadas.	38

4.6. Campaña de medición, Mayo 2016.	39
4.7. Representación esquemática de las mediciones.	39
4.8. Método roll-along. Modificada de Loke (2016).	39
4.9. Arreglo Dipolar utilizado.	40
4.10. Disposición del modelo de bloques y de los puntos dato de resistividad aparente.	41
4.11. Salida del programa RES2DINV.	42
5.1. Ubicación de la tomografía TE colegio (Google Earth).	45
5.2. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE colegio.	45
5.3. Ubicación de la tomografía TE Techat (Google Earth).	46
5.4. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Techat.	47
5.5. Ubicación de la tomografía TE Meza.	48
5.6. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Meza (Google Earth).	48
5.7. Ubicación de la tomografía TE tdm (Google Earth).	49
5.8. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE tdm.	50
5.9. Ubicación de las tres tomografías realizadas en la comunidad Toba (Google Earth).	51
5.10. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 1.	51
5.11. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 2.	52
5.12. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 3.	53
5.13. Modelos de resistividad eléctrica del subsuelo de las tomografías realizadas.	54
6.1. Ubicación de la perforación realizada (Google Earth).	57
6.2. Perfil litológico realizado con información de pozo.	58
6.3. Correlación del modelo de resistividad verdadera y la perforación realizada.	59
6.4. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Techat.	59
6.5. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Meza.	60
6.6. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE tdm.	60
6.7. Ubicación del pozo realizado (Google Earth). La tomografía se realizó en sentido Norte-Sur.	61
6.8. Perfil litológico realizado con información de pozo.	62
6.9. Correlación del modelo de resistividad verdadera y la perforación realizada.	63
6.10. Ubicación del pozo realizado (Google Earth).	63
6.11. Perfil litológico realizado con información de pozo.	64
6.12. Correlación del modelo de resistividad verdadera y la perforación realizada.	64
6.13. Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 3.	65
6.14. Pozo cavado en los alrededores de Miraflores.	66
6.15. Ubicación de las bombas instaladas (Google Earth).	67
6.16. Proceso de construcción de la base para la colocación de las bombas manuales.	68
6.17. Bomba colocada.	68

Índice de tablas

5.1. Valores extremos de los modelos de resistividad eléctrica obtenidos a partir de las tomografías realizadas.	55
--	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

1.1.1. El Impenetrable Chaqueño y el acceso al agua

El Impenetrable chaqueño es una región del norte de nuestro país, caracterizada por sus extensos bosques de fauna nativa. Se encuentra dentro de la región mayor conocida como Chaco Seco (Figura 1.1) de aproximadamente 9 millones de hectáreas, abarcando parte de las provincias de Chaco, Salta, Formosa y Santiago del Estero (Tiddi et al., 2014). Su nombre alude al característico monte cerrado y a la falta de fuentes de agua que impedían su exploración.

Las precipitaciones anuales rondan los 500-750 mm distribuidos principalmente en la estación húmeda, entre noviembre y abril. En la estación seca, entre mayo y octubre, las precipitaciones son escasas o prácticamente inexistentes (Guarracino, 2017).

Los habitantes de la región se encuentran organizados en comunidades rurales y comunidades aborígenes Qom y Wichí, cuyo núcleo económico está basado principalmente en la agricultura y ganadería. Es importante destacar que se trata de una de las regiones de nuestro país con mayor índice de pobreza y desnutrición infantil (Guarracino et al., 2018).

En el año 2014, 128.000 hectáreas de la región del interfluvio de los ríos Bermejo o Teuco (Figura 1.2) y Bermejito fueron declaradas Parque Nacional, bajo la Ley N° 26.996 (Figura 1.1). Esta medida fue tomada especialmente por la presencia de especies en peligro de extinción como el yaguararé y por el riesgo que representa la deforestación de los bosques en una zona proclive a sufrir procesos de desertificación (Tiddi et al., 2014).

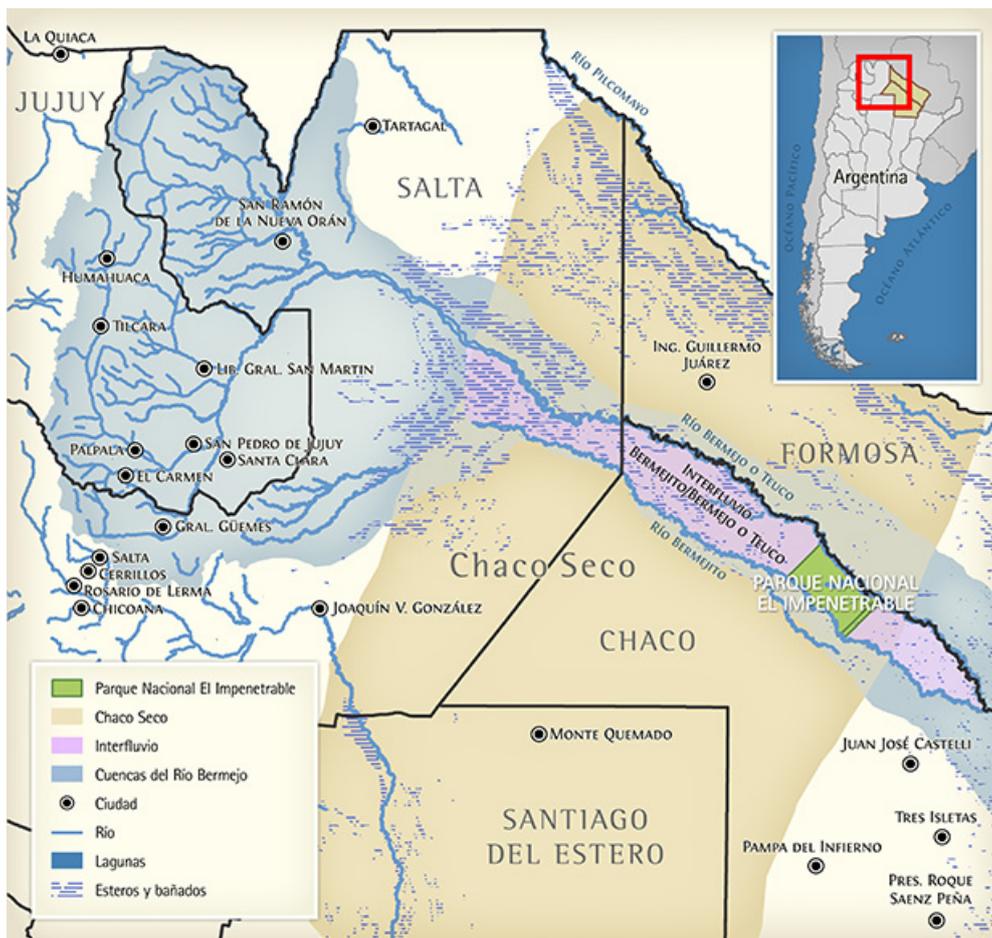


Figura 1.1: Extensión de la región Chaco Seco. Extraída de Tiddi et al. (2014).



Figura 1.2: Río Bermejo. Extraída de Tiddi et al. (2014).

En la provincia de Chaco se encuentra la localidad de Miraflores (Figura 1.3), también conocida como “la puerta al Impenetrable”. La misma forma parte del partido General Güemes y cubre una totalidad de 80 km^2 y cuenta con aproximadamente 7.946 habitantes según el censo del INDEC en el año 2010. Se encuentra rodeada de una extensa zona rural dividida en radios o fracciones, generalmente denominados parajes.

La situación hídrica en Miraflores es muy compleja. En primer lugar, no cuenta con una red de abastecimiento de agua potable; el acueducto más cercano se encuentra a 55 km en la ciudad de Castelli. El agua es transportada semanalmente en camiones al centro de la localidad (aproximadamente 100.000 litros a la semana). Sin embargo, con frecuencia resulta insuficiente para cubrir las necesidades básicas de los habitantes. Esta situación se agrava en los períodos de sequía, dando lugar a la pérdida de ganado y cosechas. La población de la zona rural se encuentra especialmente perjudicada debido a las grandes distancias que debe recorrer para poder acceder al agua. En estos lugares predomina el abastecimiento de agua a través de pozos cavados que se realizan de forma manual, de profundidades entre 8 y 15 metros. Los principales problemas con el agua subterránea son las altas concentraciones de sales y arsénico que presenta. Por otro lado, durante la época de sequía los pozos suelen quedarse sin agua. La Figura 1.4 muestra el sistema cotidiano de transporte de agua en carreta en Miraflores.



Figura 1.3: Ubicación de la Localidad de Miraflores, Chaco (Google Maps).



Figura 1.4: Transporte de agua en carretas, desde Miraflores a la zona rural.

1.1.2. Geoscientist Without Borders (GWB)

La Sociedad de Geofísicos de Exploración (SEG, por su acrónimo en inglés de *Society of Exploration Geophysicists*; <https://seg.org/>) es una organización internacional sin fines de lucro fundada en el año 1930 y conformada actualmente por miembros de 128 países. La oficina central se encuentra en Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos. La misma se dedica a promover la Geofísica, especialmente aplicada a la exploración. Entre sus tareas, la SEG se encarga de proporcionar información, herramientas y recursos, organiza congresos y reuniones internacionales, además de promover ampliamente la participación de estudiantes.

La SEG cuenta con un programa llamado Geocientíficos sin Fronteras (GWB, por su acrónimo de inglés de *Geoscientists Without Borders*), el cual se encarga de apoyar y promover las aplicaciones humanitarias de las Geociencias. Su propósito principal es proporcionar el financiamiento para proyectos que beneficiarán a comunidades, donde la aplicación de estas ciencias resulta de utilidad para mejorar las condiciones de vida de las personas.

Actualmente, GWB cuenta con treinta y seis proyectos alrededor del mundo, categorizados según la problemática a resolver. La Figura 1.5 muestra un mapa con los proyectos financiados.

En el año 2013, desde de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de la Plata, se presentó un proyecto en la categoría Manejo del agua (*Water Management*) de GWB. Ésta iniciativa fue impulsada por un grupo de estudiantes y profesores a partir de la inquietud de un alumno, quien compartió la preocupación por la creciente severidad de la problemática del agua en su poblado natal Miraflores, Chaco. La propuesta resultante fue nombrada “*Groundwater resources for small rural and Aboriginal communities in Chaco province, Argentina*”, elegida y aprobada por la SEG en el año 2013. Constituyó el primer proyecto de GWB en Argentina y el segundo en América Latina en ese entonces.



Figura 1.5: Proyectos financiados por GWB en el mundo. Extraído de <https://seg.org/About-SEG/Geoscientists-Without-Borders/Projects>

A través de métodos geofísicos, el proyecto tiene como objetivo la evaluación de recursos hídricos subterráneos en los alrededores de Miraflores. A su vez, propone la identificación de sitios para realizar posibles pozos de abastecimiento, estimar la calidad del agua y reducir las concentraciones de arsénico. El proyecto inició en el año 2014, realizándose las primeras campañas a lo largo de los años 2014 y 2015 (Figura 1.6).



Figura 1.6: Relevamientos realizados en las primeras campañas en los alrededores de Miraflores, Chaco.

1.2. Antecedentes

Desde un punto de vista hidrogeológico, las fuentes de agua dulce de la región son escasas. En general, predominan los sedimentos loésicos de origen eólico y textura fina. Sin embargo, existen pequeños paleocauces (antiguos lechos de ríos o arroyos) que se encuentran desde la superficie hasta profundidades estimadas entre 8 y 15 metros. Estos depósitos fluviales se caracterizan por presentar texturas arenosas, lo que les confiere alta permeabilidad y capacidad para almacenar agua. Algunos de ellos afloran en superficie y pueden ser detectados en imágenes satelitales.

Estudios hidrogeofísicos en la región del Impenetrable fueron realizados por el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH) bajo el proyecto “Prospección Geofísica con fines hidrogeológicos en la región central de la provincia del Chaco”, a través de un convenio con la Provincia de Chaco y la Corporación Financiera Regional del Nordeste Argentino S.A (COFIRENE S.A). Se midieron una gran cantidad de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) sobre antiguos caminos creados por Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF) en la zona central de Chaco. Este método de prospección geofísica consiste en el estudio de las variaciones del potencial eléctrico generado por una fuente de corriente. Las mediciones de campo estuvieron a cargo de la Comisión Geoeléctrica N° 1 de la Unidad Geofísica del INCYTH. En los informes correspondientes se presentan los resultados de la interpretación de los SEVs realizados, definiendo una zona superficial de espesor menor a 20 metros que presenta una gran variabilidad de resistividad (5-300 Ωm), debido a la presencia de heterogeneidades laterales. Se destaca la existencia de antiguos cauces de ríos, conocidos como ríos muertos o paleocauces (Bonini et al., 1977a y b).

La tomografía de resistividad eléctrica resulta una técnica adecuada y ampliamente utilizada en la identificación de cambios litológicos y salinidad del agua. En comparación a los SEV, las tomografías eléctricas constituyen estudios de mayor detalle ya que permiten determinar la resistividad del subsuelo a lo largo de un perfil en dos dimensiones. Han sido empleadas exitosamente en distintos problemas hidrológicos como el estudio de la relación entre aguas superficiales y subterráneas (Chirindja et al., 2016) o la determinación de la interface entre agua subterránea dulce y salada en regiones costeras (Nowroozi et al., 1999; Nassir et al., 2000; Batayneh, 2006). En nuestro país existen numerosos ejemplos de la aplicación de esta técnica entre las que se destacan la evaluación hidrogeológica de acuíferos de llanura en la provincia de Buenos Aires (Perdomo et al., 2013a; Ruiz et al., 2016), y del acuífero costero del Partido de la Costa y Pinamar (Perdomo et al., 2011; Perdomo et al., 2013b; Perdomo et al., 2013c). Mastrocicco et al. (2010), utilizan la tomografía eléctrica para el estudio y delimitación de un paleocauce en la Llanura Padana, Italia. Los autores obtienen que para sedimentos limo-arenosos dentro del paleocauce, la resistividad es mayor a 40 Ωm , mientras que para sedimentos arcillosos y limo-arcillosos que lo rodean, ésta no supera los 20 Ωm .

En el año 2014 comenzaron los estudios realizados en el marco del proyecto “*Groundwater resources for small rural and Aboriginal communities in Chaco province, Argentina*”. Inicialmente, se realizó un censo con el objetivo de evaluar la situación hídrica en los alrededores de Miraflores, en el cual se visitaron más de 70 familias y comunidades aborígenes. En los sitios donde existían pozos o perforaciones de abastecimiento, se tomaron muestras de agua para medir conductividad y concentración de arsénico. Los valores de conductividad observados varían entre 0.1 y 10.4 mS ; aunque la Organización Mundial de la Salud no establece un rango de valores para la apto para consumo humano (World Health Organization, 2011), se considera agua dulce hasta 1 mS y salobre entre 1 y 10 mS . Con respecto al análisis de arsénico realizado, los valores censados varían entre 0 y 0.25 mg/l ; el valor de concentración de arsénico máximo establecido para el consumo humano por la Organización Mundial de la Salud es de 0.01 mg/l (World Health Organization, 2011).

Los primeros estudios de geoeléctrica realizados en el marco del proyecto se llevaron a cabo

en octubre del 2014. En dicha campaña se midieron SEVs, con el objetivo de caracterizar la respuesta del terreno dentro y fuera de los paleocauces.

1.3. Objetivos

Los estudios previos realizados en la región de Miraflores indican que el agua subterránea posee elevadas concentraciones de sales, salvo en pequeñas lentes de agua dulce en paleocauces. La resistividad del subsuelo está fuertemente influenciada por el contenido de agua y el grado de salinidad que presenta. En este contexto, este trabajo busca a través de los métodos eléctricos de prospección caracterizar las posibles fuentes someras de agua dulce de la región.

El objetivo principal es la utilización de tomografías eléctricas como herramienta para identificar y caracterizar la extensión lateral y el espesor de los paleocauces. Para ello, se procura desarrollar el instrumental complementario necesario para lograr las características de tomografía deseadas.

A partir de la caracterización obtenida, se pretende proponer lugares para realizar perforaciones. Además, comparar la información litológica de las perforaciones con los modelos obtenidos en las tomografías.

Por último, se busca calificar la eficacia del método en la identificación de fuentes de agua somera en la región y determinar la posibilidad de utilizarlo a futuro en zonas de estudio con características similares.

Capítulo 2

Área de estudio

Como se mencionó en el Capítulo anterior, el área de estudio de esta tesis se encuentra en la localidad de Miraflores, incluyendo los parajes que la rodean. A continuación, se brinda una breve descripción de la región desde los puntos de vista relevantes a este trabajo: geológico, hidrogeológico y geomorfológico.

2.1. Geología

La Figura 2.1, extraída de Ramos (1999), muestra una distribución de las provincias geológicas en Argentina. La provincia geográfica de Chaco se encuentra en la denominada Llanura Chaco-Bonaerense, una gran planicie de baja pendiente y gran extensión areal (Ramos, 1999).

Dentro de esta llanura, se pueden destacar diferentes cuencas sedimentarias, por ejemplo, la cuenca del Salado, la de Claromecó y la Chaco-Paranaense. En esta última se sitúa el área de estudio del presente trabajo. En la cuenca Chaco-Paranaense existen importantes sistemas fluviales como el Pilcomayo y Bermejo. Estos sistemas fueron modificados por la acción eólica durante los períodos glaciales, y en consecuencia se formaron llanuras de loess (Ramos, 1999).

El loess es un sedimento predominantemente limoso que cubre la mayor parte de la superficie de la cuenca, cuyo origen es volcano-piroclástico (Teruggi, 1957). Al norte de la cuenca, estos sedimentos presentan un espesor promedio de entre 10 y 20 m hacia el oeste, disminuyendo hacia el sector centro y este donde alcanzan un espesor máximo de 10 metros (Sayago et al., 2001). Los mismos componen la sección más superficial de la columna estratigráfica, conformada por los grupos Pampiano y Post-Pampiano del Cuaternario, que se sitúan sobre una secuencia sedimentaria del Terciario (Gonzalez Arzac et al., 1994). Aunque en la región predomina el loess, también pueden encontrarse depósitos arenosos de sedimento más grueso y permeable que forman los paleocauces.

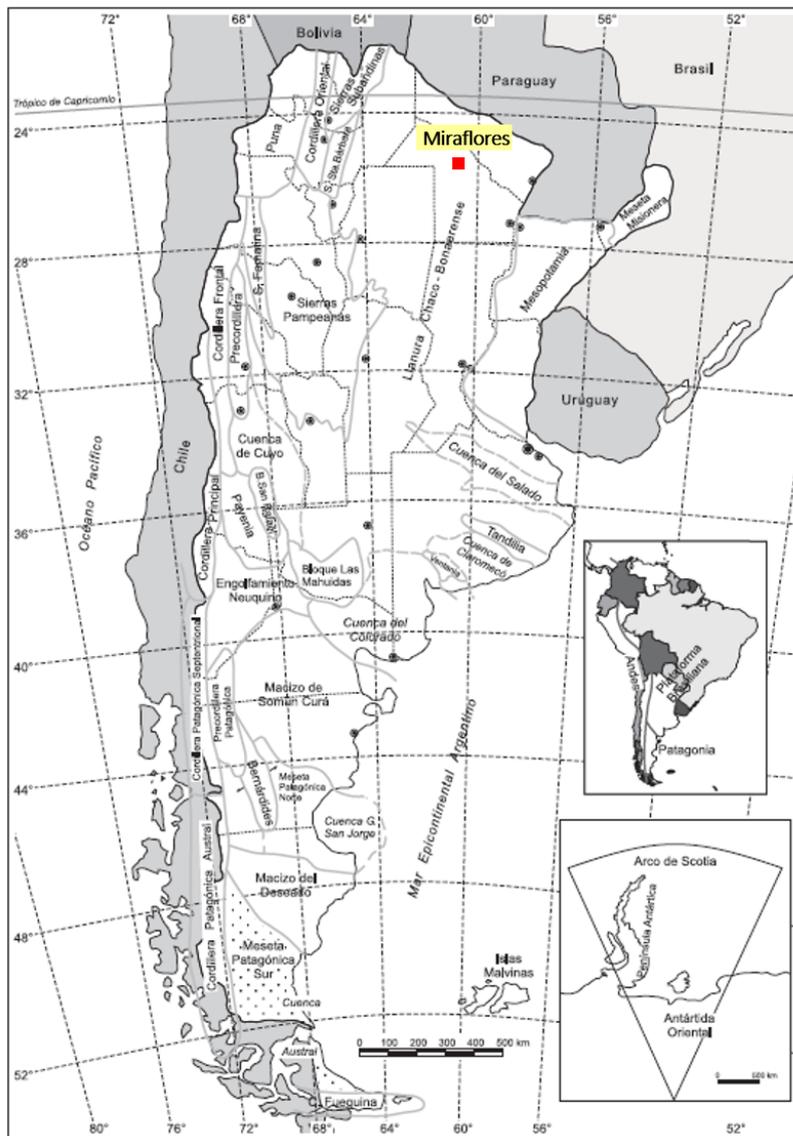


Figura 2.1: Distribución de las provincias geológicas en Argentina. Extraído de Ramos (1999).

2.2. Hidrogeología

Según la clasificación propuesta por Auge (2004) (Figura 2.2), el área de estudio del presente trabajo se encuentra dentro de la región hidrogeológica denominada Llanura Chaco-Pampeana Árida, la cual abarca aproximadamente 650.000 km^2 .

En esta región, los ríos por lo general son perdedores, y la recarga se focaliza en las depresiones (Auge, 2004). Existen muchos cauces temporales, que resurgen en la época de lluvias y desaparecen en la de sequía.

Las fuentes superficiales de agua subterránea corresponden a acuíferos cuya dinámica esta vinculada al régimen de precipitaciones locales. El nivel freático se encuentra entre los 5 y 12 metros de profundidad, según las mediciones realizadas en la campaña del año 2014.

Como se dijo anteriormente, los grupos Pampiano y Post-Pampianos se caracterizan por estar compuestos de sedimentos limosos que por ser explotados en algunos sectores de la región son definidos como acuíferos, pero se comportan como acuitardos (Gonzalez Arzac et al., 1994). Aquellas zonas con composición arenosa asociada a depósitos fluviales (paleocauces) se comportan como acuíferos y suelen presentar agua de mejor calidad (Gonzalez Arzac et al., 1994).

Los acuíferos profundos (profundidad mayor a 300 metros) de la región son el Guaraní, que se extiende desde Brasil hasta la provincia de Entre Ríos, y el Toba que abarca parte de Salta, Formosa, Chaco, Paraguay y Bolivia. A pesar de que los límites de estos sistemas acuíferos son inciertos debido a la escasez de información y perforaciones profundas (Fuertes, 2004; Rossello y Veroslavsky, 2012), las posibilidades de encontrar agua dulce a estas profundidades en el área de estudio son bajas por tratarse de zonas de descarga.

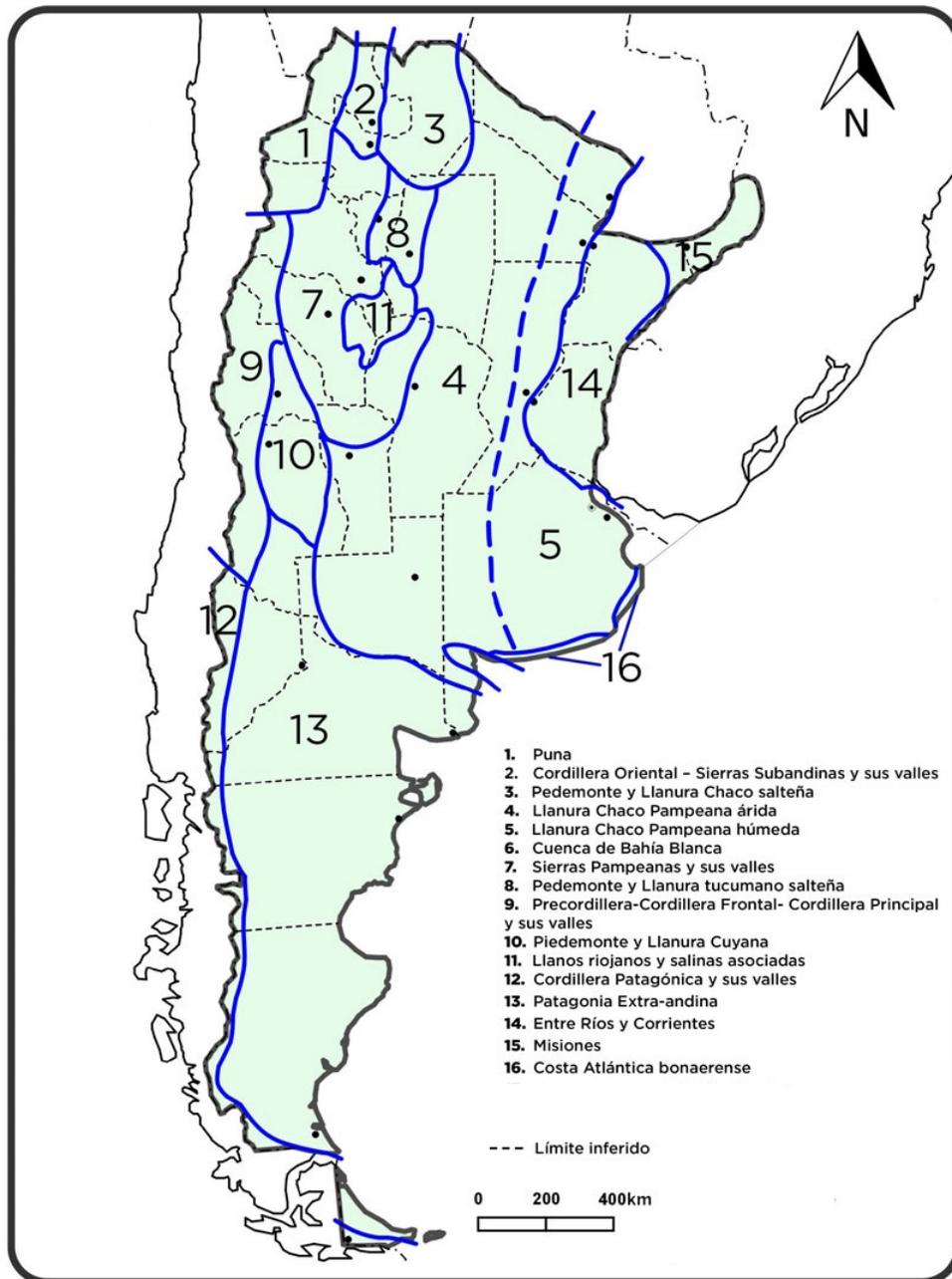


Figura 2.2: Regiones Hidrogeológicas de la Argentina (Auge, 2004). Modificado de http://aquabook.agua.gob.ar/416_0.

2.3. Geomorfología

Basterra (2004) recurre a una subdivisión de la región del Impenetrable chaqueño en diferentes zonas según su patrón de topografía de suelos y vegetación, la cual puede apreciarse en la Figura 2.3. Por un lado, la llanura de derrame del río Bermejito, hacia el Oeste los Depósitos del Río Juramento y por último los denominados Antiguos cauces. Dentro de esta última subregión se encuentra Miraflores y su extensión rural.

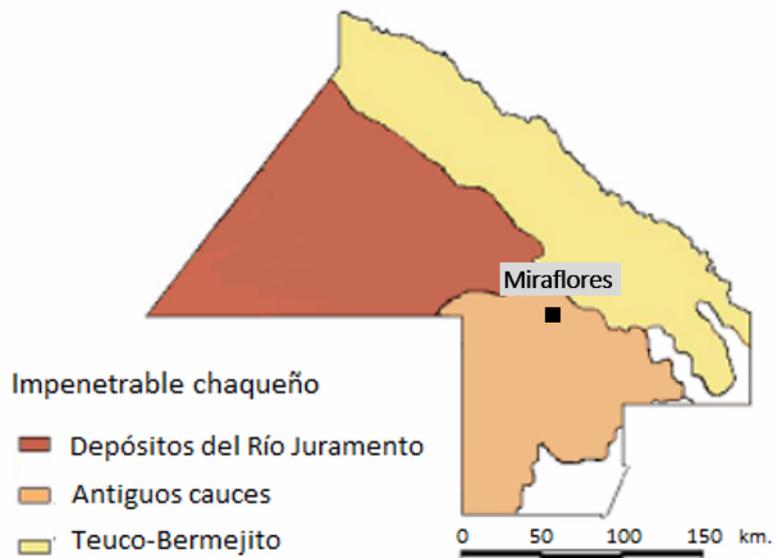


Figura 2.3: Subdivisión según geomorfología del Impenetrable chaqueño. Modificada de Basterra (2004)

En cuanto a la vegetación, en general predominan bosques de quebrachos, matorrales de arbustos y espinales, patrón que presenta importante contraste con los paleocauces, donde la vegetación cambia y se limita principalmente a pastizales.

Por lo general, los paleocauces se encuentran en las capas más someras, pudiendo aflorar en superficie. Los espesores varían según las condiciones de formación, generalmente presentando geometría lentiforme asociada a depósitos fluviales de canal (Gonzalez Arzac et al., 1994). En líneas generales, se trata de estructuras que se formaron y cambiaron en el tiempo a través de la acumulación de arenas y sedimentos en el lecho o fondo de los ríos. Ante períodos de sequía o modificaciones del curso, el río desaparece dejando la sedimentación del material que transportaba. Dependiendo de las condiciones, podrían reactivarse en época de grandes lluvias.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Método eléctrico de prospección

La prospección geofísica abarca las técnicas físicas y matemáticas utilizadas con el fin de explorar el subsuelo mediante observaciones en superficie (Orellana, 1982). En particular, el método eléctrico estudia la resistividad eléctrica, siendo su objetivo principal la determinación de su distribución en el subsuelo. La resistividad eléctrica describe la dificultad que encuentra la corriente al circular por un medio. Se expresa en unidades de Ωm (Ohm · metro) y su inversa se denomina conductividad.

El método consiste básicamente en la inyección de corriente continua en el terreno y la medición de la diferencia de potencial generada en superficie, para luego estimar los valores de resistividad del subsuelo. Constituye uno de los primeros métodos geofísicos utilizados y ha sido aplicado en diferentes escalas de trabajo y con diversos propósitos como exploración hidrogeológica, medioambiental, de hidrocarburos, minería, geotecnia y arqueología (Loke et al., 2013).

3.2. Resistividad de las rocas

Supongamos un cilindro conductor homogéneo de resistividad constante, como se muestra en la Figura 3.1. La resistencia a la circulación de corriente entre sus extremos puede expresarse como:

$$R = \rho \left[\frac{l}{s} \right] \quad (3.1)$$

donde R [Ω] es la resistencia, ρ [Ωm] la resistividad, l [m] la longitud y s [m^2] la sección transversal. La resistividad es una propiedad intrínseca del material, mientras que la resistencia depende de la geometría del cuerpo. Según el valor de resistividad, o de su inversa la conductividad, un determinado material se puede caracterizar como conductor, semiconductor o aislante.

La resistividad es un parámetro físico con un gran rango de variabilidad, abarcando varios órdenes de magnitud. Por lo general, las rocas y sedimentos que componen el subsuelo están conformados por materiales que no poseen gran conductividad, sin embargo, las soluciones acuosas con presencia de cationes y aniones libres (electrolitos líquidos) son buenas conductoras. En consecuencia, la resistividad del subsuelo está ampliamente influenciada por la porosidad de las rocas, el contenido de agua y su grado de salinidad.

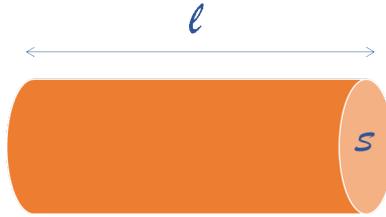


Figura 3.1: Cilindro conductor homogéneo.

La resistividad de la roca y del fluido presente en los poros pueden vincularse a través de la Ley de Archie (Archie, 1942), dada por:

$$\rho = \rho_e \phi^{-m} \quad (3.2)$$

donde ρ y ρ_e son la resistividad de la roca y del fluido respectivamente, ϕ es la fracción del volumen de roca ocupado con fluido, y m es conocido como parámetro de cementación. Este último parámetro suele variar entre 1.3 y 2.3, dependiendo del tipo y grado de cementación de la roca (Orellana, 1982).

La Ley de Archie ha sido modificada introduciendo un parámetro a , que depende de la textura de la roca (Orellana, 1982), dando lugar a la ecuación de Winsauer:

$$\rho = a \rho_e \phi^{-m} \quad (3.3)$$

El parámetro a también depende de la roca y su textura, generalmente toma valores entre 0.5 y 1.5.

Además, existen otros factores responsables de la variación de la resistividad en las rocas a considerar como la temperatura, presión, granulometría y presencia de inclusiones conductoras. Como puede observarse en la Figura 3.2 (modificado de Loke, 2016), el rango de resistividad para una misma roca es amplio, por lo que puede resultar complejo realizar una asignación litológica a un único valor de resistividad.

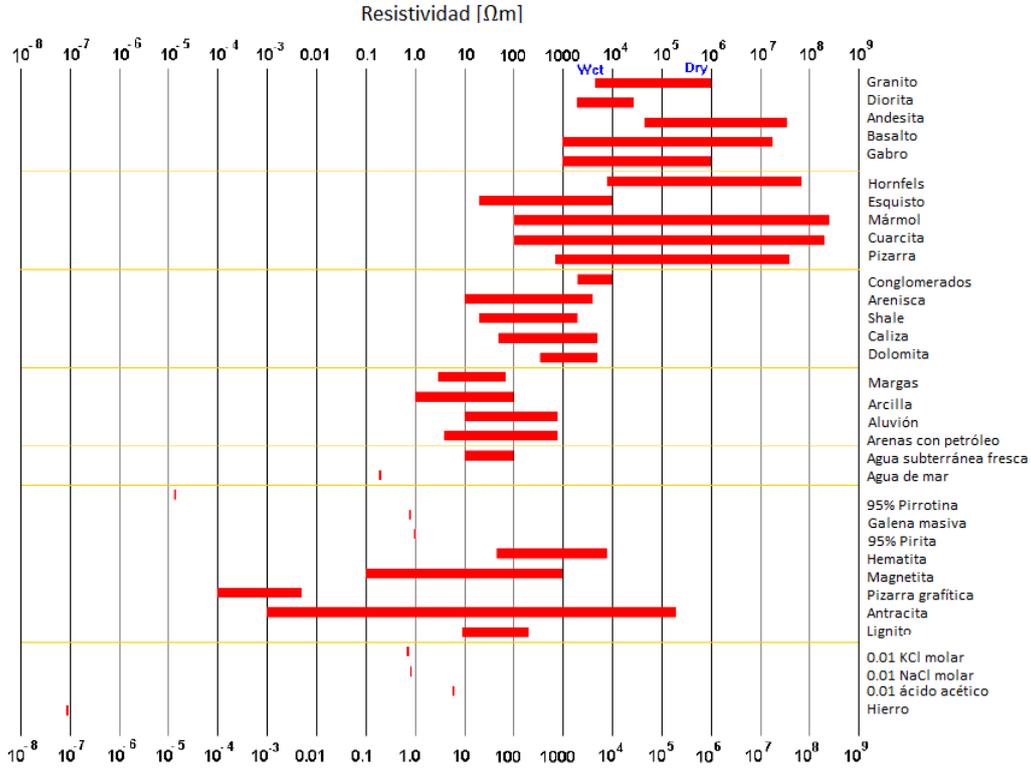


Figura 3.2: Rangos de variaci3n de resistividad de rocas y minerales. Para las rocas, el extremo izquierdo del rango representa la saturaci3n de agua y el derecho la ausencia de la misma. Modificado de Loke (2016).

3.3. Ley de Ohm

La Ley de Ohm propone que la densidad de corriente \vec{J} es directamente proporcional al campo el3ctrico en ese mismo punto (Orellana, 1982):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.4)$$

donde σ es la conductividad el3ctrica del medio, \vec{J} es la densidad de corriente y \vec{E} el vector campo el3ctrico. Adem3s, por ser 3ste 3ltimo un campo conservativo, podemos expresarlo como el gradiente espacial de una funci3n potencial escalar V :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3.5)$$

Si utilizamos esta expresi3n en la ecuaci3n (3.4), suponiendo que el campo el3ctrico tiene una 3nica direcci3n dl , resulta:

$$J = \sigma \left[-\frac{dV}{dl} \right] \quad (3.6)$$

Por otro lado, la densidad de corriente \vec{J} puede expresarse como:

$$\vec{J} = \frac{\vec{I}}{s} \quad (3.7)$$

siendo \vec{I} la corriente y s el área transversal por donde circula (Figura 3.1). Utilizando las ecuaciones (3.7) y (3.1) en la ecuación (3.6), y expresando la conductividad como la inversa de la resistividad, para el caso unidimensional se obtiene:

$$\Delta V = IR \quad (3.8)$$

Esta expresión se conoce como forma sencilla o reducida la Ley de Ohm, y expresa la relación entre corriente, diferencia de potencial y resistencia en un conductor.

3.4. Campo eléctrico en un medio continuo

Para poder estudiar el comportamiento de los campos en los medios continuos se parte del caso más simple: un semiespacio homogéneo e isótropo. Supongamos que hacemos circular una corriente eléctrica continua generada por los electrodos C1 y C2 (Figura 3.3). Los electrodos son los extremos de un conductor en contacto con un medio no metálico al que lleva o del que recibe corriente eléctrica. La resistividad del semiespacio ρ es constante, y asumimos la resistividad del aire infinita. Por ser un régimen estacionario, la corriente que ingresa I_1 será igual a la corriente que sale del terreno I_2 , pero con sentido contrario. El campo eléctrico generado cumple con la ecuación 3.5 (Ainchil, 2015).

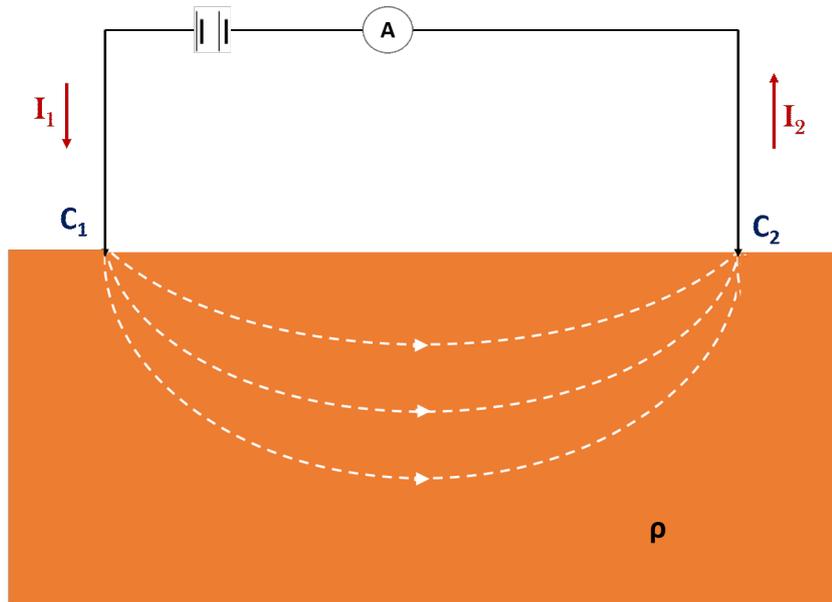


Figura 3.3: Circulación de corriente entre dos electrodos en un medio continuo, homogéneo e isótropo.

Por otro lado, se cumple la ecuación de continuidad en todos los puntos excepto C1 y C2:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (3.9)$$

Reemplazando con la Ley de Ohm (3.4) en (3.9), se obtiene:

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{E}) = 0 \quad (3.10)$$

$$\sigma \vec{\nabla} \cdot \vec{E} + \vec{\nabla} \sigma \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.11)$$

Utilizando la ecuación (3.5) en (3.11) y teniendo en cuenta que el segundo término se anula por homogeneidad, resulta:

$$-\sigma \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} V) = 0 \quad (3.12)$$

en consecuencia,

$$\vec{\nabla}^2 V = 0 \quad (3.13)$$

La ecuación anterior expresa que el potencial cumple la ecuación de Laplace, salvo en los puntos donde se encuentran los electrodos de corriente.

Con el objetivo de encontrar una solución para un semiespacio homogéneo, suponemos que el electrodo C2 se encuentra en el infinito (Figura 3.4). Las líneas de corriente serán radiales y las superficies equipotenciales semiesferas. Por simetría, la magnitud de la densidad de corriente, J , tendrá el mismo valor en cualquier punto de una semiesfera (Orellana, 1982):

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.14)$$

Utilizando nuevamente la Ley de Ohm (3.4) en (3.14) podemos reescribir el módulo del campo eléctrico como:

$$E = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (3.15)$$

Por lo tanto, si queremos encontrar la diferencia de potencial generada entre dos puntos cualesquiera en superficie P_1 y P_2 , reemplazamos (3.15) en (3.5), integramos y obtenemos:

$$V_{P_2}^{P_1} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (3.16)$$

donde r_1 y r_2 son las respectivas distancias entre los puntos y C1.

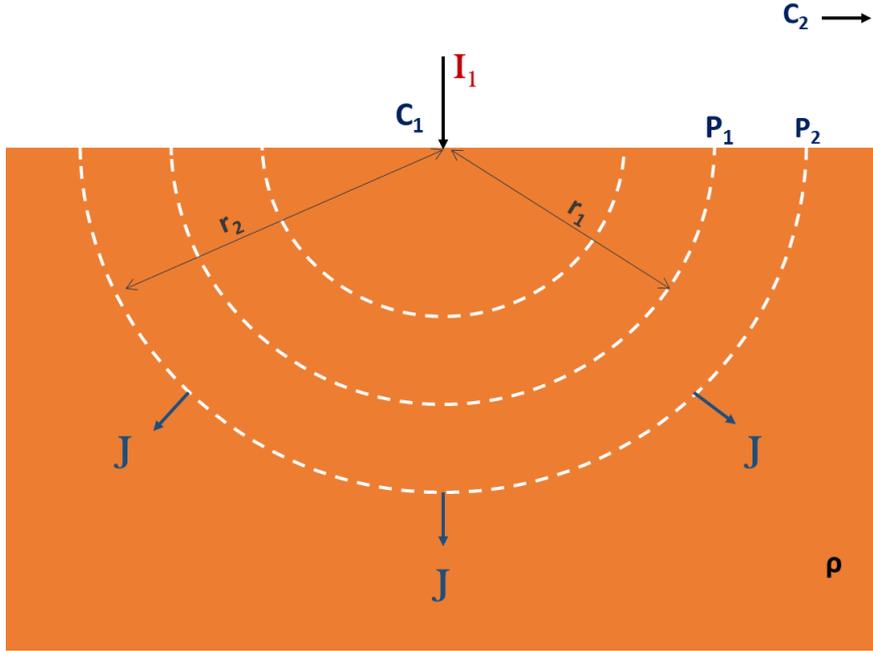


Figura 3.4: Líneas de corriente generadas por un electrodo en un medio continuo, homogéneo e isótropo.

3.5. Configuraciones electródicas

Para conocer la resistividad del subsuelo el método eléctrico utiliza agrupaciones de electrodos con disposiciones particulares, llamados arreglos o configuraciones electródicas. Comúnmente se trabaja con 2 electrodos para la inyección de corriente, $C1$ y $C2$. Para medir la diferencia de potencial generada en el subsuelo por la corriente inyectada se utilizan otros dos electrodos, $P1$ y $P2$ (Ainchil, 2015).

A partir de la medición de la corriente inyectada I y de la respectiva diferencia de potencial generada en el subsuelo ΔV , podemos calcular la resistividad con la siguiente expresión:

$$\rho = K \left[\frac{\Delta V}{I} \right] \quad (3.17)$$

donde K es un coeficiente denominado constante geométrica que depende únicamente de las posiciones relativas de los electrodos (Orellana, 1982). En el caso más general toma la forma:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right]^{-1} \quad (3.18)$$

donde r_{C1P1} , r_{C2P1} , r_{C1P2} y r_{C2P2} son las respectivas distancias entre los electrodos (Orellana, 1982).

Si intercambiamos los electrodos de corriente por los de potencial las ecuaciones anteriores no varían, lo cual se conoce como principio de reciprocidad.

Los arreglos básicos más utilizados son los arreglos lineales, en los que todos los electrodos se encuentran dispuestos sobre una misma recta. En la Figura 3.5 tomada de Loke (2016) pueden

observarse algunos de estos arreglos con su correspondiente constante geométrica. El parámetro a designa el espaciado interelectródico y n es el factor de separación, el cual toma valores enteros.

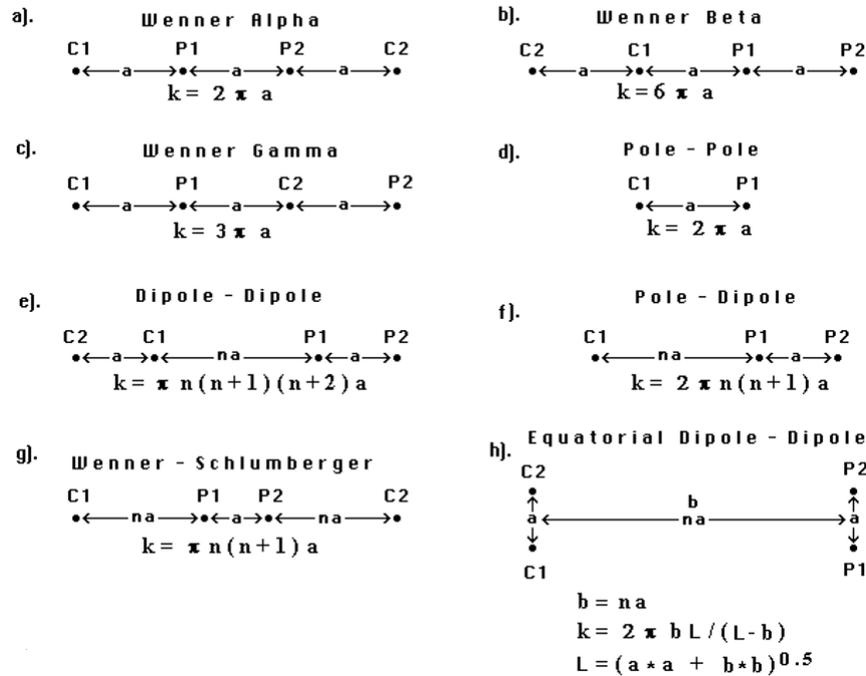


Figura 3.5: Arreglos electródicos lineales más utilizados, con la expresión para el cálculo de la constante geométrica K . Extraído de Loke (2016).

3.6. Resistividad aparente y verdadera

La ecuación (3.17) es únicamente válida para un medio homogéneo e isótropo, bajo estas condiciones, al aplicarla podríamos conocer la resistividad verdadera del subsuelo a partir de las mediciones de campo. Como el medio a estudiar no cumple con estas hipótesis, la resistividad calculada se denomina resistividad aparente y para obtener un modelo de resistividad verdadera del subsuelo, se debe realizar un proceso de inversión.

3.7. Estudios geoelectricos en una dimensión

Los estudios tradicionales de los métodos eléctricos de prospección en una dimensión son el SEV y la calicata (Orellana, 1982). El primero busca medir la variación de resistividad aparente en la vertical bajo un punto fijo. Para ello, se realizan diferentes mediciones aumentando la separación entre electrodos de corriente para lograr aumentar la profundidad de estudio, manteniendo el punto seleccionado como centro del arreglo. En cambio, las calicatas tienen como objetivo medir la variación de resistividad aparente en dirección lateral, a una profundidad fija.

En este caso, la separación entre electrodos se mantiene fija para mantener la profundidad de investigación, pero en cada medición se desplaza el arreglo lateralmente.

3.8. Planteo directo y problema inverso

La Geofísica es la ciencia que estudia la estructura y los procesos físicos que tienen lugar en la Tierra, a través de principios provenientes fundamentalmente de los campos de la física y la matemática. A grandes rasgos, esta ciencia puede dividirse en geofísica pura y aplicada.

Para poder representar la Tierra y el subsuelo se utilizan modelos. Es importante recordar que se trata de idealizaciones físico-matemáticas que tienen como fin representar el objeto de estudio. Estos modelos están compuestos por parámetros, es decir, cantidades físicas y geométricas que los definen.

Existen dos tipos de metodologías para resolver problemas en geofísica conocidos como el planteo directo y el problema inverso. Por un lado, resolver el planteo directo significa partir de un modelo de subsuelo con parámetros pre-establecidos y obtener su respuesta en superficie. Es decir, calcular a través de las relaciones matemáticas la respuesta teórica a las mediciones. Resolver el problema inverso implica realizar el proceso contrario. A través de mediciones realizadas (generalmente sobre la superficie) se busca encontrar los parámetros del modelo de subsuelo cuya respuesta mejor se ajusta a las mediciones realizadas. Particularmente, en la prospección geo-eléctrica se busca encontrar la distribución de resistividades verdaderas del subsuelo partiendo de las mediciones de resistividades aparentes observadas en el campo.

3.9. Teoría de la inversión

Para poder resolver el problema inverso se realiza el proceso conocido como inversión. El procedimiento básico consiste en partir de un modelo inicial y calcular su respuesta (planteo directo). A partir del error obtenido comparando la respuesta con los datos observados, se modifican los parámetros del modelo y se repite el proceso en forma iterativa hasta que se alcanza un error aceptable según la tolerancia establecida (Figura 3.6).

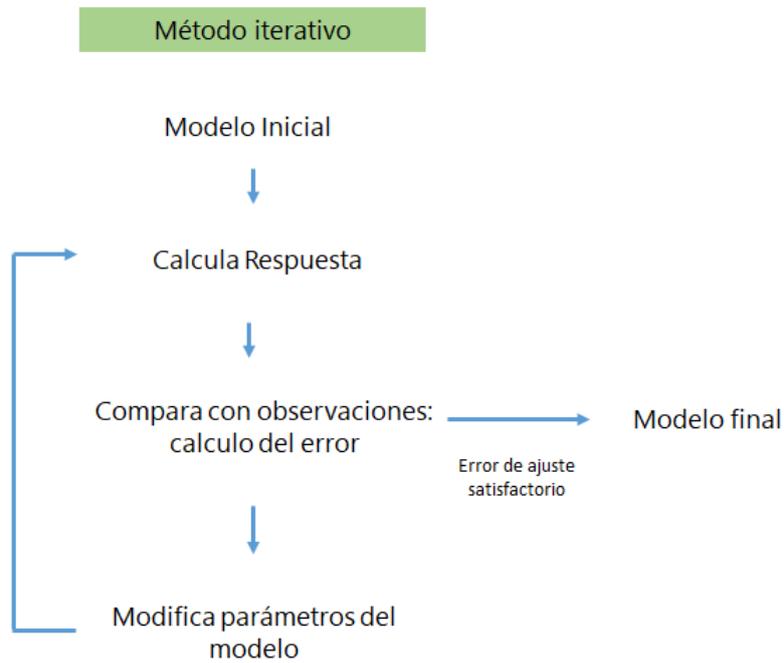


Figura 3.6: Esquema de inversión.

Siguiendo el razonamiento de Loke (2006), supongamos una serie de m valores observados, que representamos en forma de vector:

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Además, consideremos un modelo inicial cuyos n están dados por:

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

y su correspondiente respuesta calculada:

$$\vec{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

En el proceso de inversión se buscará que la respuesta del modelo se aproxime a las observaciones realizadas, en otras palabras, reducir el valor de una función \vec{g} de la forma:

$$\vec{g} = \vec{y} - \vec{f} \quad (3.22)$$

Para lograr este objetivo existen métodos de optimización. En particular, el método de mínimos cuadrados busca minimizar la suma del cuadrado de los errores:

$$E_r = \vec{g}^T \vec{g} = \sum_{j=1}^n g_j^2 \quad (3.23)$$

Para poder calcular la modificación que debe realizarse en los parámetros q_j del modelo propuesto y que reduce el error E_r , se utiliza la ecuación de Gauss-Newton:

$$J_a^T J_a \Delta \vec{q}^i = J_a^T \vec{g} \quad (3.24)$$

donde $\Delta \vec{q}^i$ es el cambio en los parámetros en el paso i de la iteración, y J_a es la matriz jacobiana definida como:

$$J_a(k, j) = \frac{\partial f_k}{\partial q_j} \quad (3.25)$$

Frecuentemente el problema puede estar mal condicionado debido a la singularidad del producto $J^T J$. Para evitarlo, se propone la modificación de Marquardt-Levenberg aplicada a la ecuación de Gauss-Newton:

$$(J_a^T J_a + \lambda I) \Delta \vec{q}^i = J_a^T \vec{g} \quad (3.26)$$

donde I es la matriz identidad y λ el factor de Marquardt o factor de atenuación. Este factor restringe el rango de valores que puede tomar $\Delta \vec{q}$, y así evitar problemas de inestabilidad. El método es también conocido como método de mínimos cuadrados amortiguado.

Para grandes cantidades de parámetros a minimizar, el modelo resultante puede tener zonas anómalas de resistividad que toman valores muy grandes o muy pequeños. Para resolver este problema, se realiza una nueva modificación a la ecuación de Gauss-Newton para minimizar la variación espacial del modelo y obtener cambios graduales o suaves en la resistividad. Este método de inversión por mínimos cuadrados se conoce como restringido por suavidad o *smoothness – constrained*, y tiene la siguiente forma:

$$(J_a^T J_a + \lambda F) \Delta \vec{q}^i = J_a^T \vec{g} - \lambda F q_i \quad (3.27)$$

$$F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z \quad (3.28)$$

donde C_x , C_y , C_z son las matrices filtro que acoplan los bloques del modelo en esas direcciones, y α_x , α_y y α_z los pesos relativos dados a estas matrices.

3.10. Tomografías de resistividad eléctrica

Las tomografías de resistividad eléctrica (TRE) o imágenes de resistividad eléctrica son estudios de prospección en dos dimensiones. Los modelos del subsuelo correspondientes son más precisos que los modelos en una dimensión. A diferencia de los SEVs y las calicatas eléctricas, la resistividad puede variar tanto en la dirección vertical, como en la horizontal. El método supone que no existe variación en la dirección perpendicular a la sección de estudio, suposición que resulta adecuada para cuerpos geológicos elongados, como las geoformas objeto de estudio en el presente trabajo. Siguiendo el mismo razonamiento, los estudios en tres dimensiones son aún más precisos. Sin embargo, en la actualidad los estudios en dos dimensiones mantienen una relación conveniente entre los costos, tiempo de medición y resultados (Loke, 2016).

Para realizar el estudio, en primer lugar, se deben ubicar un conjunto de electrodos equiespaciados a lo largo de una línea y conectarlos a un cable multinúcleo. Este cable se conecta al resistivímetro integrado con una caja conmutadora electrónica. Para cada medición que conforma la tomografía se deben seleccionar, por lo general, cuatro electrodos de la línea, dos de energización y dos de medición. La caja conmutadora se encarga de seleccionar los electrodos participantes y éstos van variando en cada medición para lograr diferentes posiciones de dato sobre la sección 2-D de la tomografía. Previo a comenzar, se indica al resistivímetro la cantidad de electrodos, su espaciamiento y el arreglo de medición. Este último contiene la información de la secuencia que deberá seguir la caja conmutadora. Tanto el espaciamiento de los electrodos, como el arreglo son elegidos de acuerdo a la resolución, cobertura y profundidad buscadas, y al tiempo disponible para los estudios. Los arreglos más populares en la prospección geoelectrica en dos dimensiones son Wenner, dipolar, Wenner-Schlumberger, bipolar y trielectrónico. En la Figura 3.7 modificada de Loke (2016) se puede observar un esquema de la disposición en el campo y un ejemplo de secuencia de medición para el arreglo Wenner.

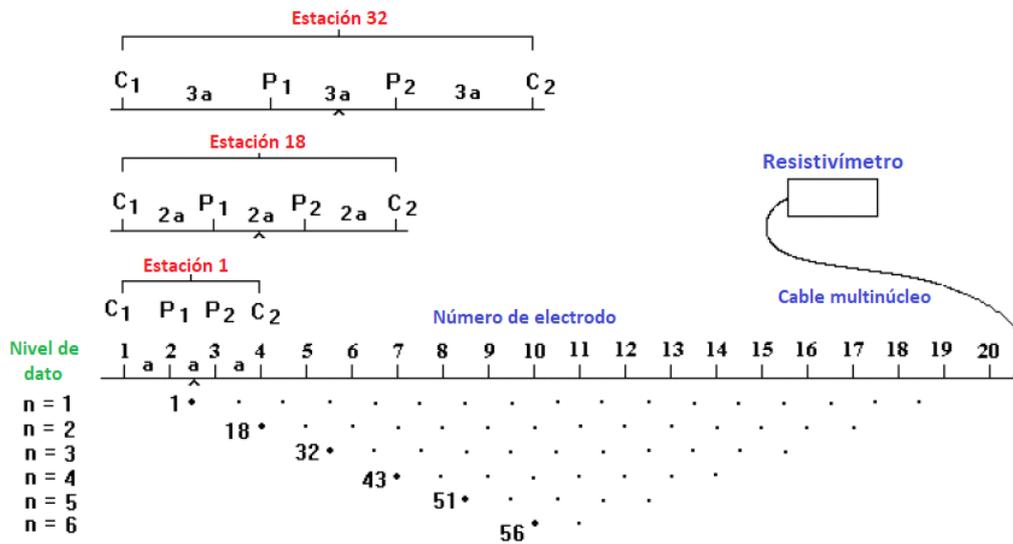


Figura 3.7: Esquema de medición de tomografías. La secuencia de medición es para caso del arreglo Wenner (modificado de Loke, 2016).

3.11. Modelo de discretización del espacio y pseudosección

Para la discretización del dominio espacial bidimensional se utiliza comúnmente el modelo de celdas. La superficie o sección del subsuelo se subdivide en una grilla compuesta por celdas rectangulares de posición y tamaño pre-establecidos. Durante el proceso de inversión, las celdas permanecerán fijas y el parámetro variable del modelo a ajustar será el valor de resistividad dentro de cada celda.

En cada medición de la tomografía, se inyecta corriente y se obtiene una diferencia de potencial que, mediante la ecuación 3.17, permite obtener los valores de resistividad aparente. Se denomina pseudosección al modelo de representación de las mediciones realizadas en el subsuelo. Éste dependerá no solo de la distribución resistividades verdaderas del terreno sino también del tipo de arreglo con el que se realicen las mediciones (Figura 3.8, extraída de Loke (2016)). La ubicación

horizontal del dato es el punto medio del arreglo de los electrodos utilizados en dicha medición. En cuanto a la vertical, una representación comúnmente utilizada para el modelo dipolar, consiste en trazar una recta a 45 grados entre los electrodos de corriente y otra entre los electrodos de potencial en sentido contrario, y asignar como profundidad el punto de intersección. Otra opción es utilizar la pseudo-profundidad del arreglo elegido, la cual se obtiene a partir de la derivada de Frechet para un espacio homogéneo (Edwards, 1977). Para llegar a un modelo de resistividades verdaderas se debe realizar un proceso inversión.

3.12. Sensibilidad de los arreglos de medición

Para elegir el arreglo más adecuado se debe tener en cuenta cuál es el objeto a estudiar. Los puntos más importantes a evaluar son la profundidad, cobertura horizontal, nivel de ruido y sensibilidad a los cambios de resistividad que se espera obtener para el problema en particular. La función que refleja el modo en que una variación de resistividad en una sección del subsuelo puede afectar el potencial medido por el arreglo, se denomina función de sensibilidad, y la función matemática que la representa es la derivada de Frechet. A medida que crecen los valores de esta función, mayor será la influencia de ese sector en las mediciones realizadas (Loke, 2016).

A fin de comprender el significado de la derivada de Frechet supongamos un escenario sencillo de un electrodo de corriente C y un electrodo de potencial P separados a una distancia, siguiendo el razonamiento de Loke (2016) (Figura 3.9). Supongamos que por el electrodo C circula una corriente de 1 A y el electrodo P mide un potencial ϕ . Consideremos un cambio en el valor de la resistividad que vale $\delta\rho$ en un pequeño volumen del subsuelo $d\tau$, y cero en el resto de la sección. Según Loke y Barker (1995), se puede demostrar que el correspondiente cambio en el potencial medido por P será:

$$\delta\phi = \frac{\delta\rho}{\rho^2} \int_V \vec{\nabla}\phi \cdot \vec{\nabla}\phi' d\tau \quad (3.29)$$

donde ϕ' es el potencial resultante de situar un electrodo de corriente en la posición del electrodo de potencial P .

Para el caso de un semiespacio homogéneo se puede demostrar que el potencial ϕ generado por la corriente inyectada por un electrodo tiene la forma:

$$\phi = \frac{\rho}{2\pi[x^2 + y^2 + z^2]^{0,5}} \quad (3.30)$$

De la misma manera,

$$\phi' = \frac{\rho}{2\pi[(x - a)^2 + y^2 + z^2]^{0,5}} \quad (3.31)$$

Diferenciando las ecuaciones 3.30 y 3.31, y reemplazándolas en 3.29 obtenemos:

$$\frac{\delta\phi}{\delta\rho} = \int_V \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x - a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1,5} [(x - a)^2 + y^2 + z^2]^{1,5}} dx dy dz \quad (3.32)$$

El término dentro de la integral se conoce como la derivada de Frechet en tres dimensiones para un arreglo bipolar, es decir, un electrodo de corriente y uno de potencial. Para otros arreglos con más electrodos se debe proceder a sumar las contribuciones correspondientes.

Siguiendo este criterio, se calculan los patrones de sensibilidad para los distintos arreglos, y esto constituye un criterio de selección del arreglo más apropiado para hacer las mediciones y resolver cada problema geológico específico (Loke, 2016).

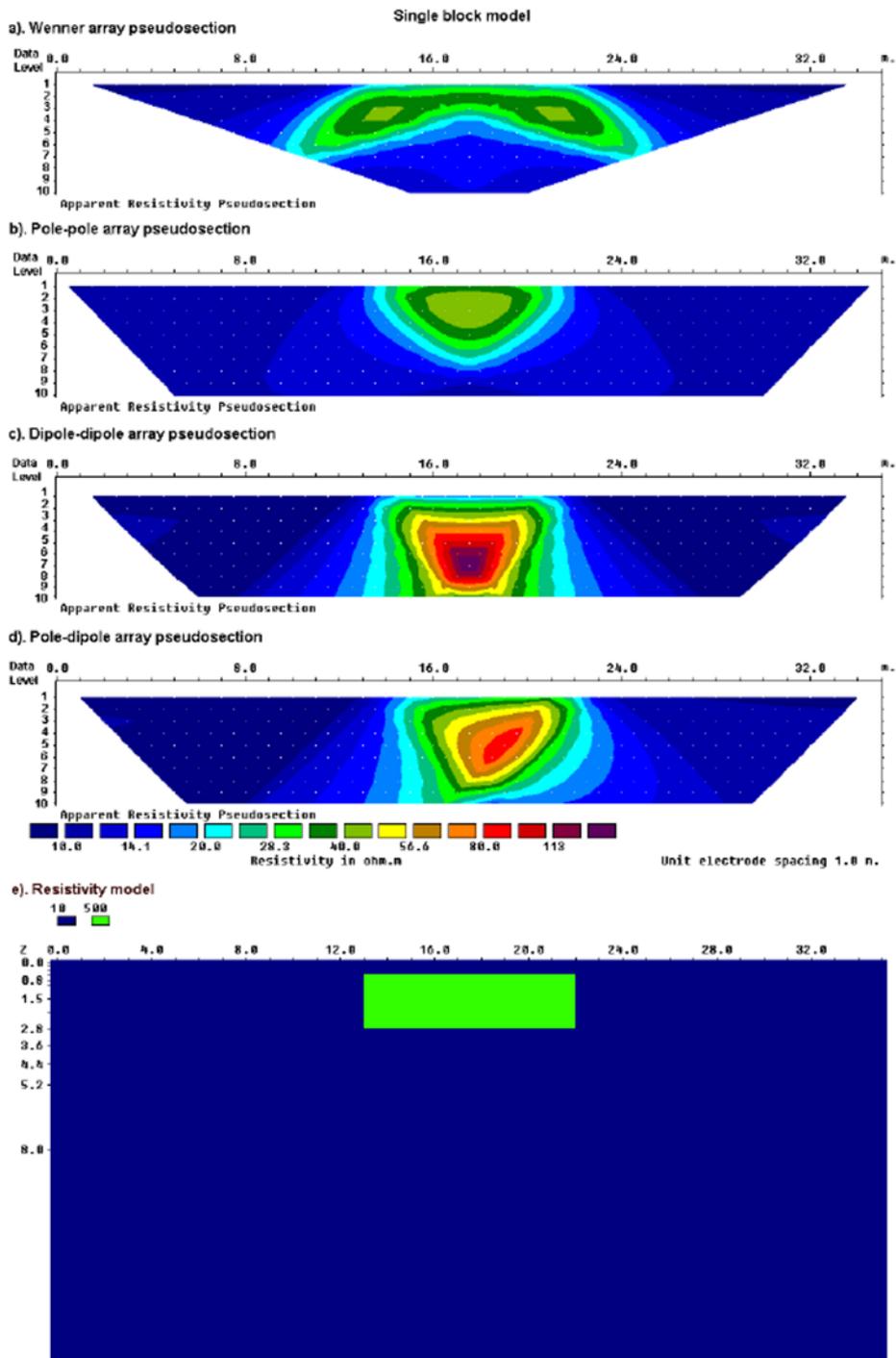


Figura 3.8: Pseudosección obtenida para distintos arreglos a partir del mismo modelo de resistividad del subsuelo planteado en la imagen e). Extraído de Loke (2016).

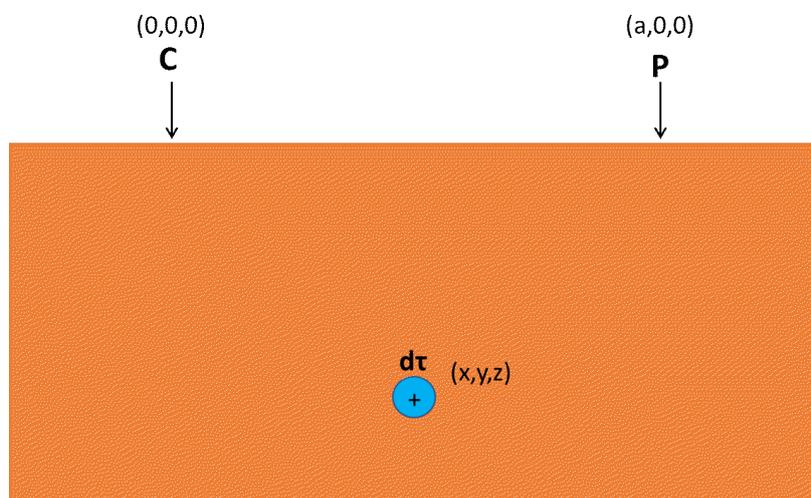


Figura 3.9: Escenario para el cálculo de la derivada de Frechet.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Campaña de reconocimiento geoelectrico

En octubre del año 2014 se realizó una campaña con el objetivo de evaluar la respuesta del terreno a la técnica de prospección geoelectrica. A través de imágenes satelitales se restringió la localización de paleocauces en la región. En la campaña se midieron SEVs dentro y fuera de dichas geoformas. Las curvas de resistividad aparente obtenidas muestran en general un comportamiento diferenciado en estos dos casos, y las resistividades aparentes crecen notablemente dentro de los paleocauces. En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo de tres SEVs realizados dentro y fuera de un paleocauce, el cual puede distinguirse en la imagen satelital (modificado de Guarracino et al., 2018).

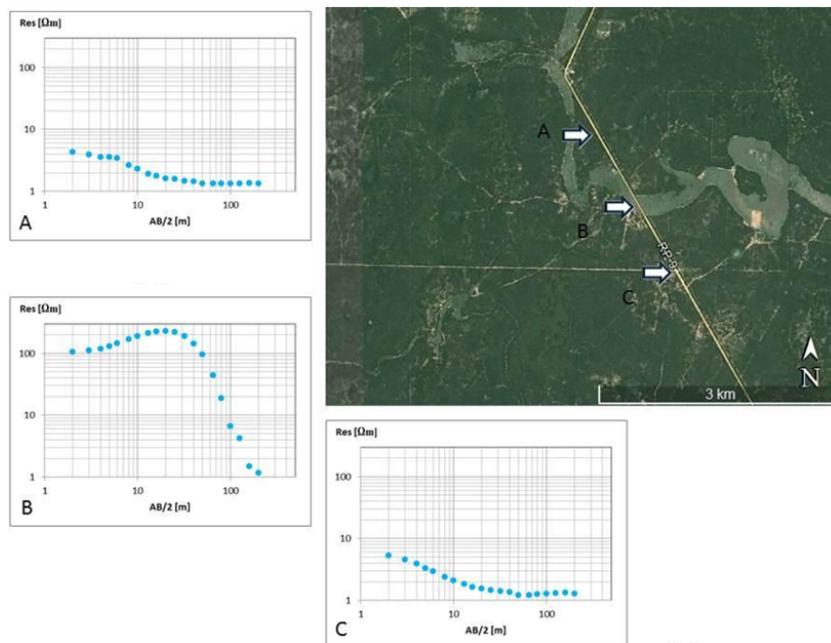


Figura 4.1: Sondeos eléctricos verticales dentro (B) y fuera (A y C) de un paleocauce (Google Earth). Modificado de Guarracino et al. (2018).

A partir de conocer los cambios de resistividad dentro y fuera de los paleocauces, resulta de interés conocer las dimensiones del mismo. En este sentido, los SEVs no permiten realizar una caracterización lateral de estas geoformas y, por esta razón, se propone realizar tomografías de resistividad eléctrica para estudiarlos y obtener un mayor detalle de la región más superficial del subsuelo.

4.2. Instrumental

A partir del análisis de las imágenes satelitales se reconoció que los paleocauces tienen una extensión lateral mínima de 5 metros, por esta razón se decidió diseñar un cable multinúcleo con una separación entre electrodos de 2.5 metros. Como además se pretendía alcanzar los 10 a 15 metros de profundidad final de exploración, se utilizaron 32 electrodos, resultando una distancia horizontal total de 77.5 metros (Figuras 4.2 y 4.3).

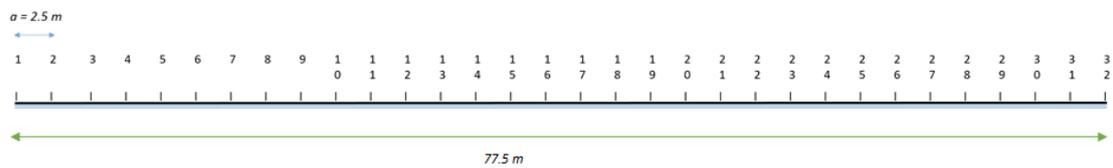


Figura 4.2: Esquema del tendido.



Figura 4.3: Diseño del tendido en el Paseo del Bosque, FCAG.

Para realizar las mediciones se utilizó un resistímetro de corriente conmutada ARES (Figura 4.4), conectado a una caja conmutadora. Esta última selecciona automáticamente los dos electrodos por los que circulará corriente y los dos electrodos con los que se medirá la diferencia de potencial.

El resistivímetro consiste en una unidad de transmisión y recepción. El transmisor puede proveer 2000V y una corriente máxima de 5A. La corriente se transmite en ciclos de polaridad inversa. Durante cada ciclo la resistividad aparente es calculada para realizar un promedio y calcular el desvío estándar.



Figura 4.4: Resistivímetro ARES con caja conmutadora.

4.3. Planificación del trabajo de campo

La selección de los sitios para realizar los estudios de campo se basó en dos criterios:

- La situación socioeconómica, enfocada en las posibilidades de acceso al agua;
- La búsqueda de rasgos geomorfológicos visibles característicos de los paleocauces a partir de la información disponible e imágenes satelitales de la zona.

Con respecto al primer criterio, desde el proyecto se realizó un análisis a partir de los censos en cada paraje de Miraflores y la información brindada por la municipalidad, puestos sanitarios y escuelas. Se dio prioridad en la selección a los sitios más afectados. Entre ellos se encuentran las comunidades aborígenes Quom de los parajes Pozo de Toro y el Zanjón, la comunidad Wichí Techat, y escuelas rurales.

En la Figura 4.5 se muestra la localización de las tomografías realizadas; la campaña de medición se realizó en Mayo del año 2016.

4.4. Medición de las tomografías

El procedimiento de medición consiste en desplegar el cable multinúcleo en la dirección a relevar, ubicar los 32 electrodos sobre esta dirección, equiespaciados 2.5 metros y conectarlos al mismo. Luego, el cable se conecta al resistivímetro y se ingresan los parámetros referentes a la tomografía: cantidad de electrodos, separación entre los mismos y arreglo elegido. El resistivímetro tiene configurados distintos arreglos a utilizar. Una vez elegido, la caja conmutadora selecciona automáticamente los electrodos que participan en cada una de las mediciones de la tomografía. El tiempo que insume la medición depende del tipo de arreglo seleccionado. En la Figura 4.6 se

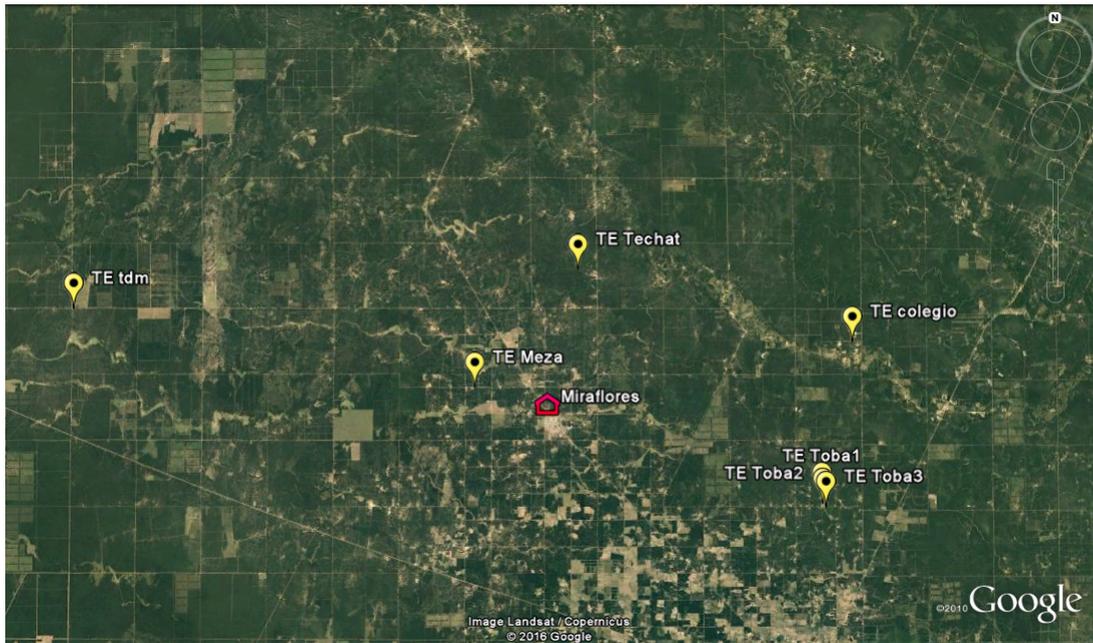


Figura 4.5: Localización de las tomografías realizadas.

observan algunas fotografías del proceso de medición. Si se desea realizar un estudio de mayor extensión, puede utilizarse el método de roll-along. El mismo consiste en mover el cable una cierta cantidad de electrodos y medir nuevamente para continuar la pseudosección. En la Figura 4.7 se muestran esquemáticamente las mediciones con el tendido utilizado. El método roll-along puede observarse en la Figura 4.8 (modificada de Loke, 2016).



Figura 4.6: Campaña de medición, Mayo 2016.

En mayor medida se buscó realizar las tomografías perpendiculares a la dirección de los cauces, buscando caracterizar las transiciones laterales de resistividades. Por otro lado, de esta forma se logra una buena correspondencia con la hipótesis fundamental de los estudios en dos dimensiones de que la resistividad no varía en la perpendicular al perfil, es decir, las estructuras deben ser elongadas en la dirección perpendicular a la sección del estudio. Sin embargo, siempre hay que tener en cuenta las posibles dificultades de acceso y el terreno para realizar los estudios.

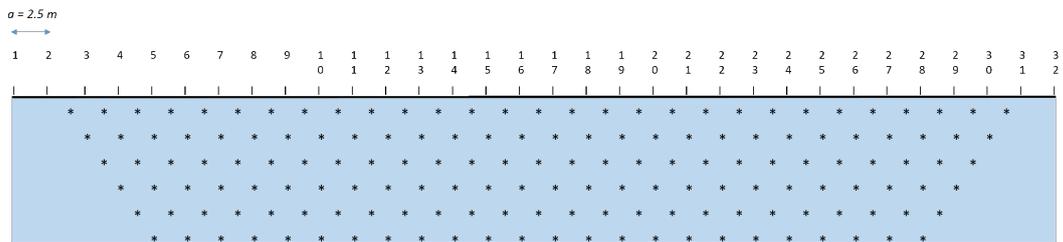


Figura 4.7: Representación esquemática de las mediciones.

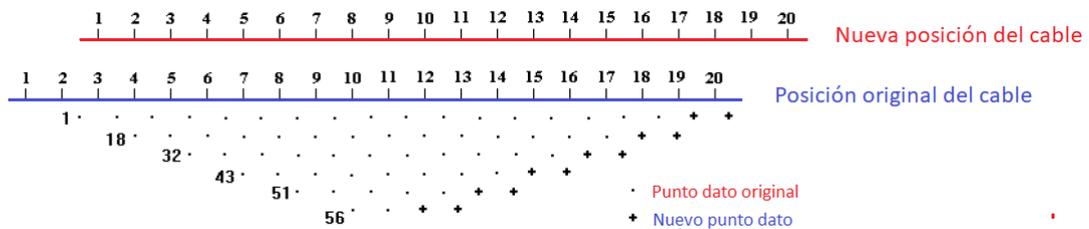


Figura 4.8: Método roll-along. Modificada de Loke (2016).

4.4.1. Arreglo utilizado

El arreglo elegido fue el dipolar por la resolución lateral que permite alcanzar, la cual se considera necesaria para distinguir la transición de resistividades. En cuanto a la función de sensibilidad del arreglo, éste resulta particularmente sensible a cambios horizontales de resistividad pero relativamente insensible a cambios verticales. Este arreglo ha sido utilizado en diversas regiones para detectar estructuras donde la resolución horizontal del arreglo representa una ventaja, por ejemplo diques y cavidades (Loke, 2016). En el caso de estudio, el arreglo dipolar permitirá definir adecuadamente los límites laterales de los paleocauces. Además, el mismo permite una rápida adquisición de los datos en campo.

La Figura 4.9 muestra la geometría básica de las mediciones del arreglo dipolar. La distancia entre cada par de electrodos tanto de corriente (Rojos: $C1$ y $C2$) como de potencial (Azules: $P1$ y $P2$) es designado con la letra a . El factor n resulta del cociente de la distancia entre $C1$ y $P1$, y a .

En primer lugar, los electrodos de corriente y la distancia a se mantienen fijos, mientras n va tomando valores enteros desde 1 hasta 6 generalmente. El aumento de n significa un incremento tanto en la posición horizontal como en profundidad. Una vez finalizado, se elige el siguiente par de electrodos de corriente $C2-C1$ y se repite el proceso. Para aumentar la profundidad de exploración, se necesita aumentar el valor de n , lo cual produce una disminución en la intensidad de la señal. El voltaje medido resulta ser inversamente proporcional a n^3 , este problema se resuelve incrementando el espaciado a entre los electrodos de corriente, por ejemplo al doble: $2a$, y realizar una nueva serie de mediciones (Loke, 2016). Esta metodología se denomina *overlap* y permite lograr una mayor resolución y muestreo del área de la tomografía.

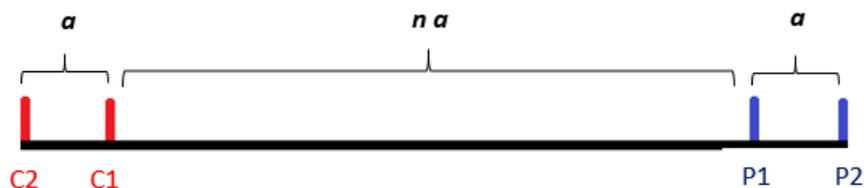


Figura 4.9: Arreglo Dipolar utilizado.

4.5. Procesamiento

El proceso de inversión fue realizado con el programa comercial RES2DINV de Geotomo Software. El mismo es comúnmente utilizado en trabajos que utilizan tomografías eléctricas (Batayneh, 2006; Perdomo et al., 2013b, entre otros).

4.5.1. RES2DINV

El programa comercial RES2DINV de Geotomo Software es un software de inversión, desarrollado por el Dr. Meng Heng Loke, director actual (Software Development and Technical Support) de dicha empresa (<http://www.geotomosoft.com>).

El programa determina un modelo en dos dimensiones de resistividades verdaderas del subsuelo a partir de mediciones de resistividad aparente de tomografías. Está diseñado para datos obtenidos con diferentes cantidades de electrodos y arreglos.

El modelo 2D de discretización del espacio que utiliza es el de celdas o bloques rectangulares. Para definir su distribución, el programa se basa en la posición asignada a las mediciones en la

pseudosección. La cantidad de celdas no sobrepasa el número de puntos dato. La profundidad de la última fila de bloques es aproximadamente igual a la profundidad media de investigación de las mediciones con mayor espaciado inter-electrónico (Edwards, 1977).

Debido a que la resolución de los estudios disminuye con la profundidad de penetración, se definen filas de celdas de espesor creciente en profundidad. Con este modelo, se obtiene un compromiso aceptable en la mayoría de los casos, aunque de así desearlo el usuario puede modificar el tamaño y posición de las celdas (Loke, 2016). En la Figura 4.10 puede observarse la distribución para la una de las tomografías medidas (TE cole), su extensión lateral es de 122.5 metros debido a la utilización del método de roll along.

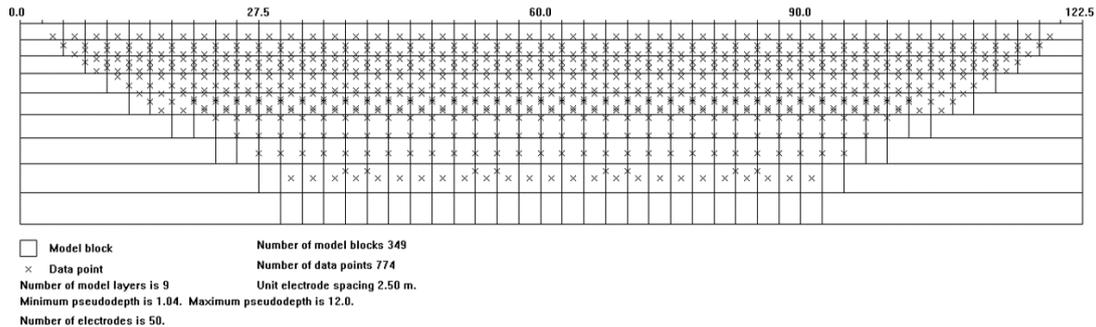


Figura 4.10: Disposición del modelo de bloques y de los puntos dato de resistividad aparente.

La inversión se realiza a través de la optimización por mínimos cuadrados. Se combina con una subrutina de modelado de diferencias finitas para calcular los valores de resistividad aparente. El programa parte de un modelo inicial de resistividades, calcula su respuesta en términos de resistividad aparente y la compara con las observaciones de la pseudosección. Trabaja en forma iterativa, y cuenta con tres criterios de corte: número máximo de iteraciones, valor mínimo del RMS, porcentaje mínimo de cambio del RMS entre iteraciones consecutivas.

La salida del programa nos muestra la pseudosección de resistividad aparente observada, el modelo del subsuelo de resistividad verdadera, y la respuesta calculada de este modelo (Figura 4.11). El RMS nos refleja cuánto se aleja la pseudosección observada de la respuesta calculada.

4.5.1.1. Acondicionamiento del dato

Para poder ingresar los datos al programa, se procedió a organizarlos en el formato requerido por este último. Debe proporcionarse información sobre la adquisición, por ejemplo, la separación entre electrodos, el arreglo utilizado y el número total de mediciones de la tomografía.

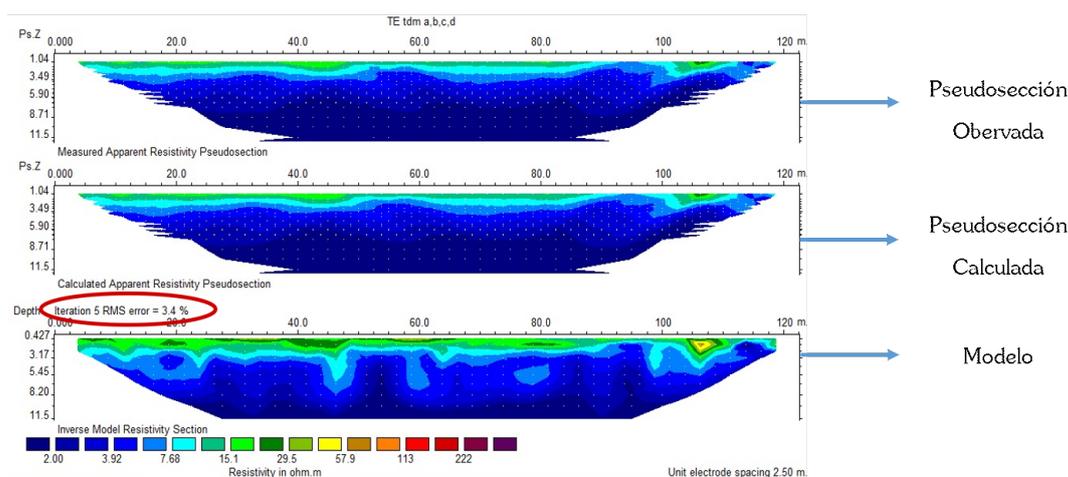


Figura 4.11: Salida del programa RES2DINV.

En segundo lugar, se deben eliminar las mediciones que presenten valores inusualmente altos o bajos (valores atípicos). Los errores se deben generalmente a problemas con los cables o bajo contacto entre el electrodo y el suelo. Por otro lado, también existen errores por ruido aleatorio. Para eliminarlos, se utiliza el desvío calculado durante el proceso de medición. Los puntos que presentan desvío estándar mayor al 5 % no fueron tenidos en cuenta para la inversión.

4.5.1.2. Parámetros de inversión

El método de inversión utilizado por el programa es el de mínimos cuadrados restringido por suavidad o *smoothness – constrained*. El mismo se encuentra detallado en la Sección 3.9.

Existen dos opciones de aplicación de este método en el programa:

- Inversión por mínimos cuadrados restringida por suavidad estándar;
- Inversión robusta.

La primera se utiliza para casos donde la variación de resistividad es suave mientras que la segunda resulta útil para casos donde existen cambios espaciales abruptos. Debido a que los límites de las estructuras de los paleocauces presentan transiciones de resistividad suaves, se utilizó la inversión estándar.

Existen dos tipos de métodos numéricos disponibles para resolver la ecuación de mínimos cuadrados: el método Gauss-Newton completo y el incompleto. El método completo resuelve la ecuación de forma directa mientras que en el incompleto la resuelve de forma aproximada (Golub y van Loan, 1989). Este último precisa menos tiempo de inversión, resultando útil para grandes cantidades de datos, pero a su vez pierde precisión en la solución. Como el tiempo de procesamiento y la cantidad de datos no eran puntos críticos en este trabajo, se utilizó el método completo.

En la inversión por mínimos cuadrados existe un factor de atenuación λ que puede ser modificado por el usuario. Por definición el programa utiliza 0.16 para la primera iteración para luego disminuirlo a la mitad en cada iteración, hasta alcanzar un valor mínimo de 0.015 establecido para evitar inestabilidades. Tanto el primer valor de atenuación como el mínimo pueden modificarse. Si los datos contienen un alto nivel de ruido, puede suceder que se obtengan valores

extremadamente altos o bajos de resistividad, por lo que suele aumentarse el factor de atenuación. Sin embargo, éste no fue el caso de las tomografías realizadas, por lo cual se mantuvo el valor por defecto.

En cuanto a la topografía, existen métodos para considerarla en casos en que los cambios de elevación a lo largo del perfil sean considerables. Las tomografías se realizaron en una región con poca pendiente, y generalmente sobre caminos, por lo que no fue necesario incorporar información de terreno.

Capítulo 5

Resultados

En este Capítulo se presentan los resultados del procesamiento de las tomografías realizadas. Los modelos obtenidos muestran una distribución de resistividades verdaderas en cada sección del subsuelo que se grafica a través de una escala de colores y el eje horizontal se dispone en la dirección del tendido. El origen se coloca sobre la posición del primer electrodo del arreglo en la primera medición de la tomografía, y el largo de cada una depende de la cantidad de extensiones por roll-along realizadas.

En el siguiente apartado se presentarán los resultados de las siete tomografías por separado, junto con los respectivos gráficos de la pseudosección de resistividades aparentes medida en el campo y la resistividad aparente calculada a partir del modelo obtenido en la inversión. Finalmente, en la sección 5.2 se resumen las características generales observadas.

5.1. Resultados individuales

Tomografía TE colegio

La primera tomografía denominada “TE colegio” se realizó en las cercanías de un colegio primario rural del paraje Costa Rica. En la Figura 5.1 puede observarse un paleocauce aflorante, localizado a través de observaciones de campo e imágenes satelitales. La imagen muestra la disposición del tendido, como puede observarse el perfil se ubicó transversal a la dirección del cauce. La Figura 5.2 muestra la salida del programa de inversión, de arriba hacia abajo: la pseudosección de resistividades aparentes observadas en el campo, la pseudosección calculada y el modelo de resistividades verdaderas. El error medio cuadrático obtenido fue de 3.7%.

En la gráfica de la distribución de resistividad verdadera puede distinguirse una primera capa somera de menor resistividad, aproximadamente $20 \Omega m$ promedio. A partir de los tres metros de profundidad, y a lo largo de todo el perfil, la resistividad aumenta considerablemente, alcanzando en algunos sectores valores del orden de $10^3 \Omega m$. Esta tomografía presenta los valores más altos de resistividad registrados en el presente estudio, siendo el máximo $4307.3 \Omega m$.



Figura 5.1: Ubicación de la tomografía TE colegio (Google Earth).

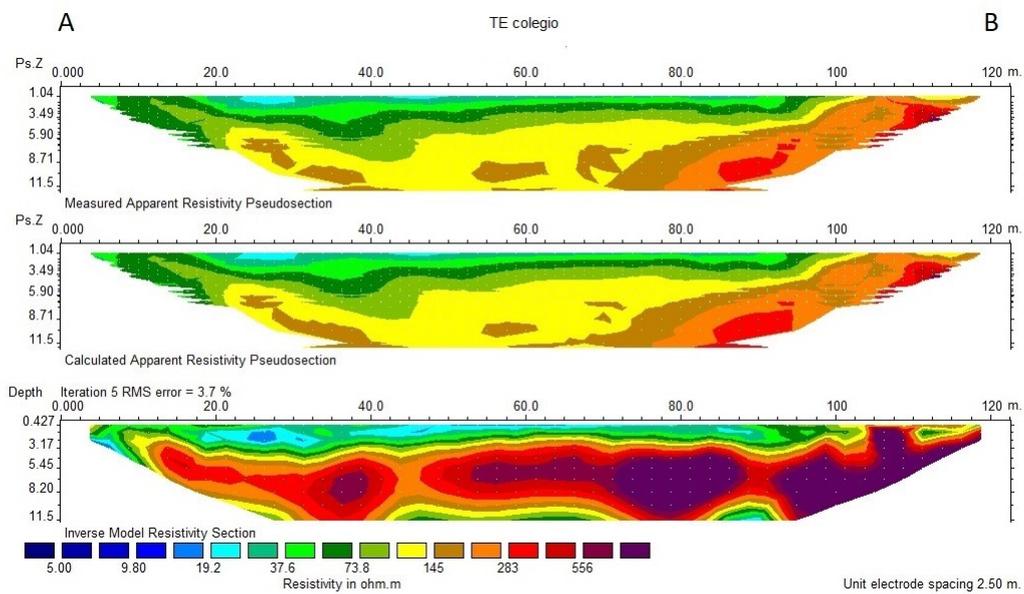


Figura 5.2: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE colegio.

Tomografía TE Techat

La tomografía denominada “TE Techat” se realizó dentro de la comunidad aborigen Wichí del paraje Techat. Su localización se puede observar en la Figura 5.3. Mediante observación en campo se detectó una transición superficial en el tipo de sedimento. Se realizó una tomografía perpendicular al cambio observado. Se debieron repetir corrimientos sucesivos de roll along para poder cubrir ambos lados de la transición. Por esta razón esta tomografía es la más larga, cubriendo 197.5 metros. El error medio cuadrático obtenido fue de 8.3%.

En la Figura 5.4 se muestran los resultados obtenidos para esta tomografía. En la gráfica se puede observar un marcado contraste horizontal aproximadamente en la progresiva de 60 metros. Las resistividades aumentan notablemente en la transición, desde valores promedio de $5 \Omega m$ hasta superar los $500 \Omega m$. En la sección más resistiva de la tomografía se observan valores altos desde la superficie hasta una profundidad promedio de 10 metros, donde vuelve a descender en forma abrupta.

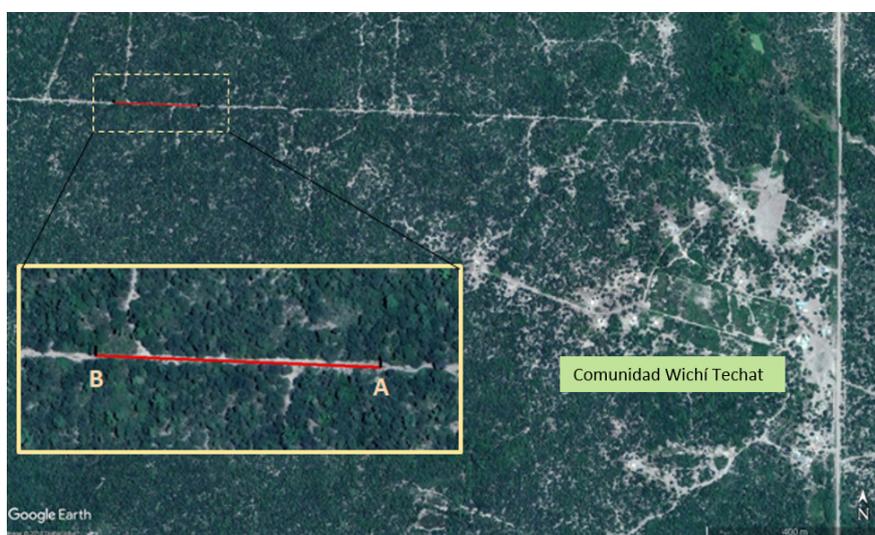


Figura 5.3: Ubicación de la tomografía TE Techat (Google Earth).

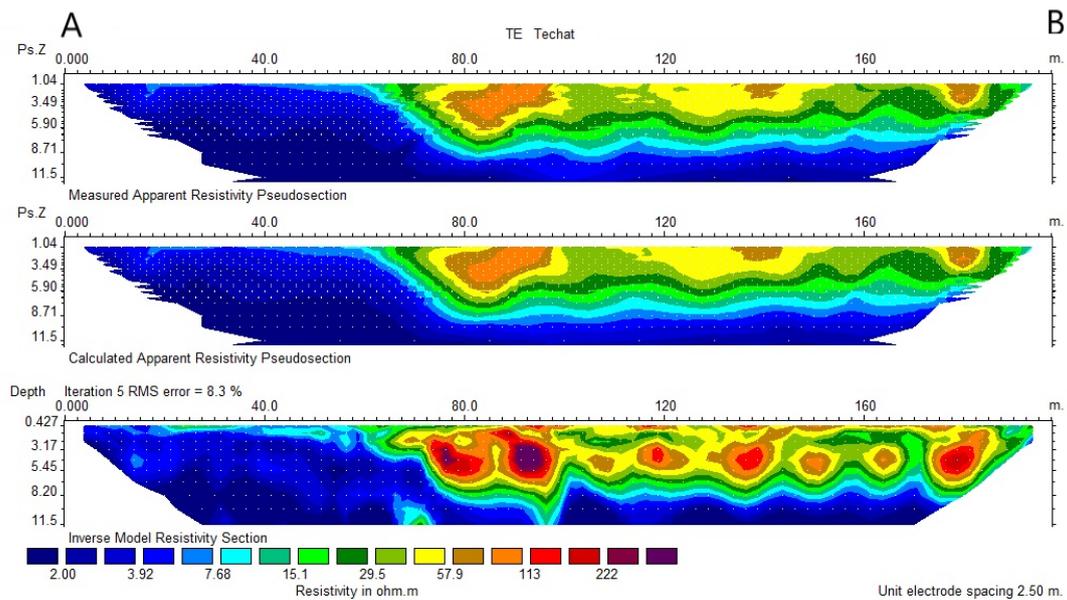


Figura 5.4: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Techat.

Tomografía TE Meza

La siguiente tomografía denominada “TE Meza” fue realizada en los límites de una propiedad privada en la cual se registró la existencia de un pozo con abundante agua dulce en comparación al resto de la zona. Se buscó detectar los rasgos geomorfológicos del paleocauce que lo contenía para estudiarlo con esta técnica. La tomografía se localizó sobre el camino como se muestra en la Figura 5.5. En la Figura 5.6 se puede observar una capa de resistividad de 30-40 Ωm en los primeros metros, que aumenta su profundidad hacia el centro de la tomografía. Las zonas más resistivas se encuentran aisladas y cercanas a la superficie (color amarillo), son de poca extensión, y llegan aproximadamente hasta 60 Ωm . El error medio cuadrático obtenido fue de 3.1%.



Figura 5.5: Ubicación de la tomografía TE Meza.

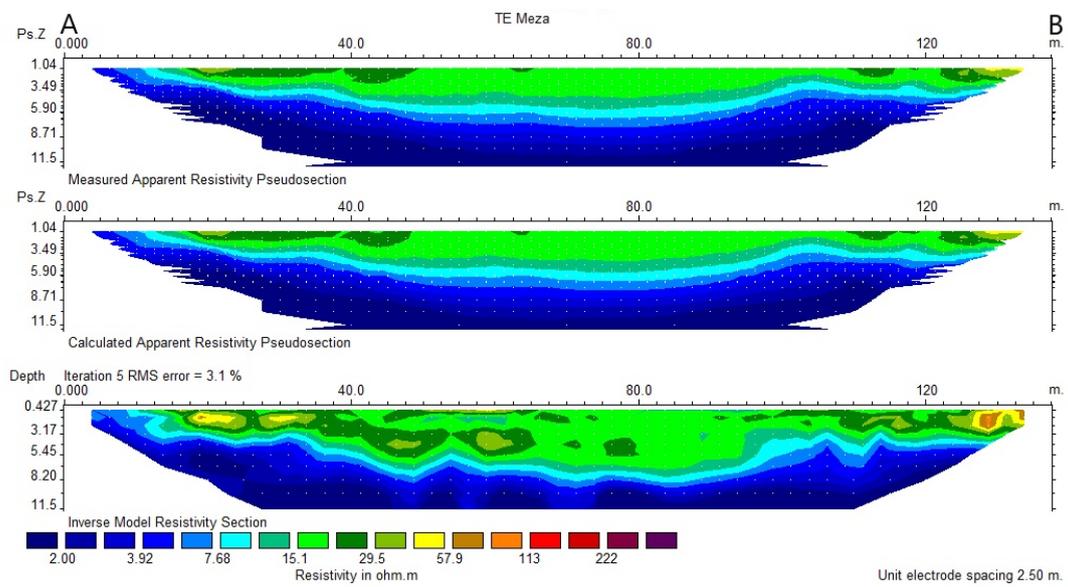


Figura 5.6: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Meza (Google Earth).

Tomografía TE tdm

Esta tomografía denominada “TE tdm” fue realizada en el predio de una escuela rural, su ubicación se muestra en la Figura 5.7. En el modelo de resistividad verdadera de la Figura 5.8 puede observarse una primera capa superficial resistiva de espesor variable que no supera los 5 metros. La resistividad que presenta ronda los $20 \Omega m$, con valores aislados máximos que no superan los $70 \Omega m$. A lo largo de toda la tomografía se observa un descenso de las resistividades en profundidad luego de esta capa. El error medio cuadrático obtenido fue de 3.4%.



Figura 5.7: Ubicación de la tomografía TE tdm (Google Earth).

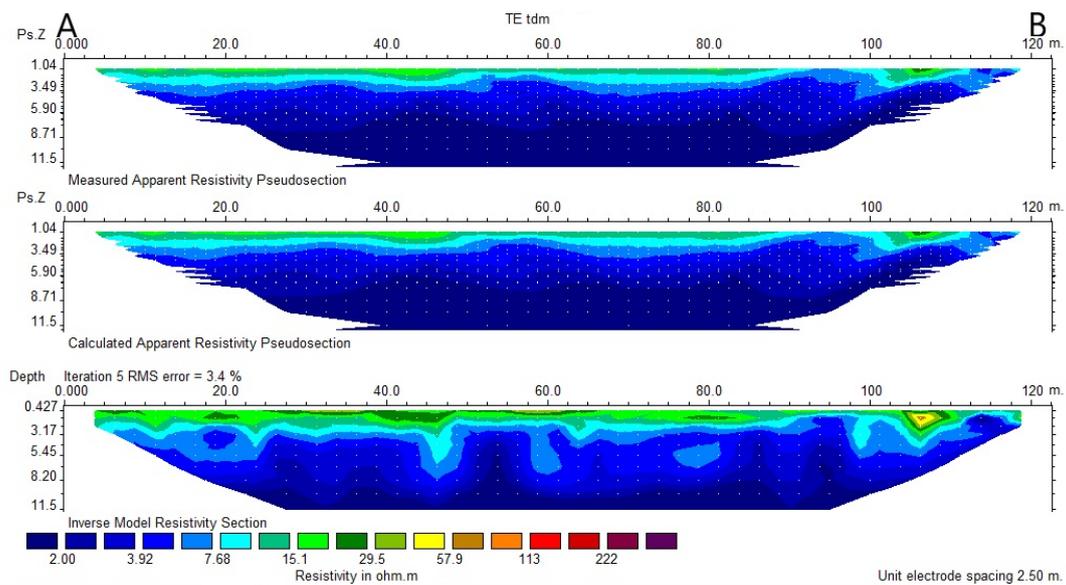


Figura 5.8: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE tdm.

Tomografía TE Toba 1

En la comunidad toba El Zanjón se realizaron tres tomografías en las cercanías de la escuela rural número 1054 (Figura 5.9). El resultado de la primera tomografía denominada “TE Toba 1” de la secuencia se muestra en la Figura 5.10. Nuevamente puede observarse en los primeros metros los valores de resistividad más altos, disminuyendo en profundidad a valores menores a $2 \Omega m$. Esta tomografía fue la menos extensa en tendido. Se realizaron dos roll along hasta alcanzar una zona de vegetación cerrada y suelo anegado. El error medio cuadrático obtenido fue de 7.4 %.

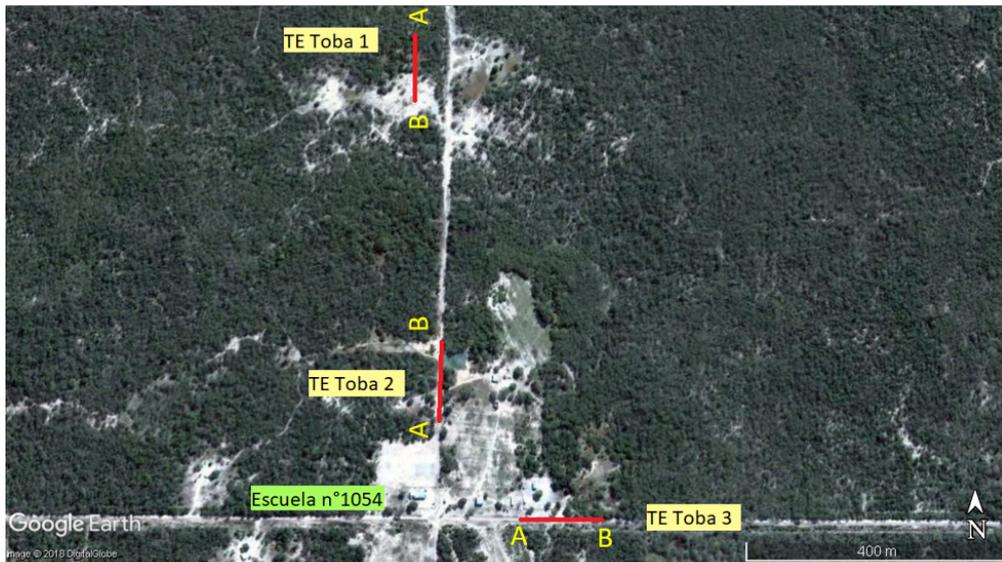


Figura 5.9: Ubicación de las tres tomografías realizadas en la comunidad Toba (Google Earth).

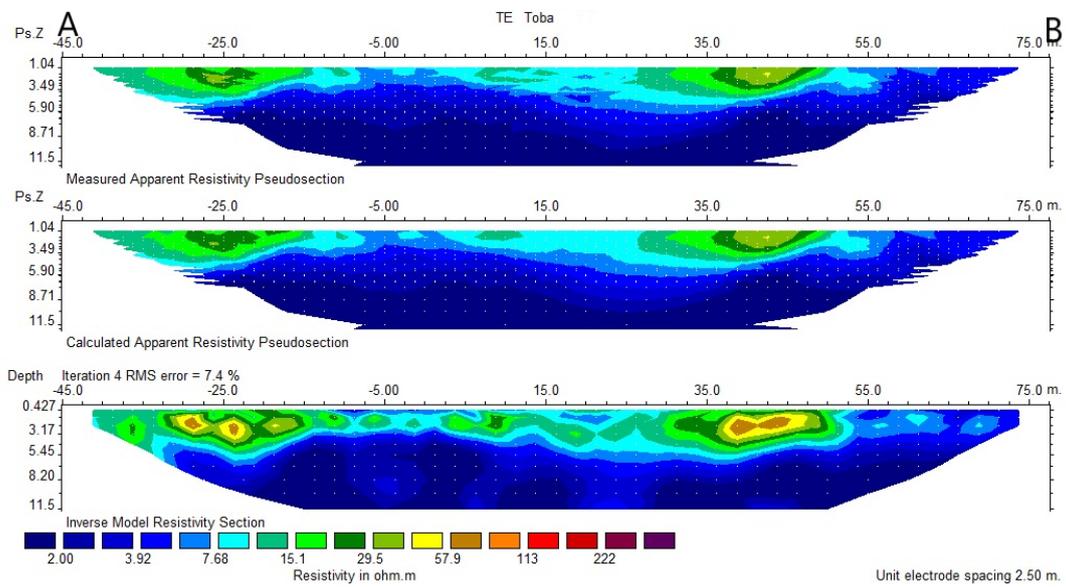


Figura 5.10: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 1.

Tomografía TE Toba 2

Esta tomografía denominada “TE Toba 2” se realizó sobre el camino perpendicular a la calle principal. Se observó una reserva de agua superficial que abarcaba aproximadamente la zona entre los 65 metros y 92.5 metros de la horizontal del perfil. En esta tomografía puede destacarse un fuerte contraste horizontal, donde las resistividades crecen desde valores menores a $2 \Omega m$ hasta sobrepasar los $200 \Omega m$ (Figura 5.11). En el sector más resistivo se observa un aumento de resistividad desde la superficie hasta los 5-6 metros, y luego un nuevo descenso rápido. A los 11-12 metros toma los valores de resistividad baja vinculados al sector izquierdo. El error medio cuadrático obtenido fue de 5.2 %.

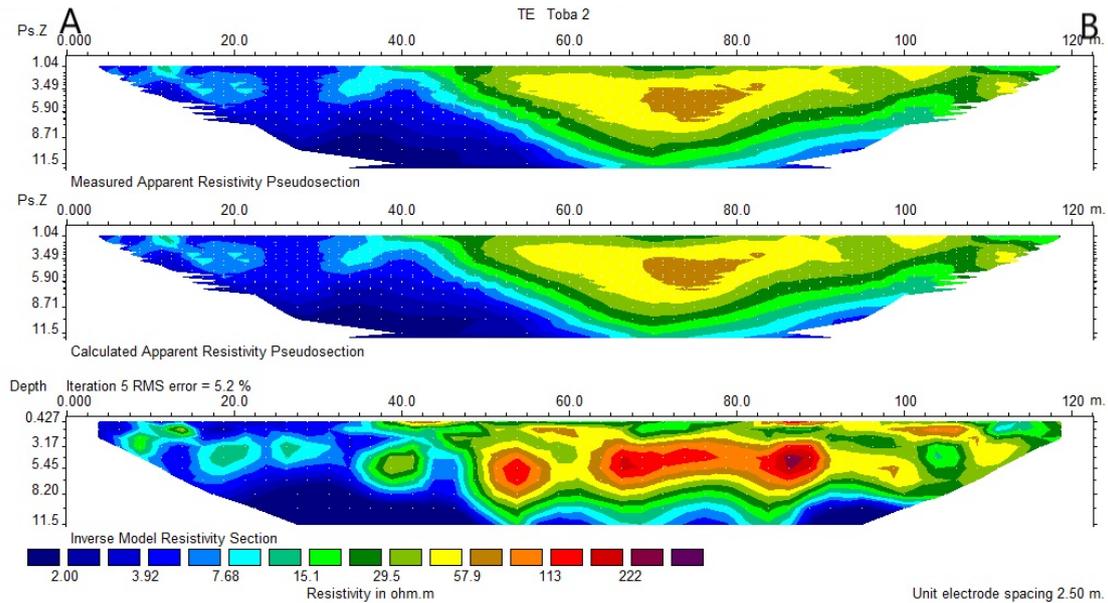


Figura 5.11: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 2.

Tomografía TE Toba 3

La última tomografía denominada “TE Toba 3” se realizó sobre la calle principal (Figura 5.9). En la Figura 5.12 se muestran los resultados obtenidos para este caso. Notar que la escala de colores fue modificada para una mejor visualización debido a las bajas resistividades de la tomografía. El menor valor de resistividad es $0.314 \Omega m$ y no supera los $65 \Omega m$. Los valores altos están acotados a una pequeña superficie, como puede verse en el sector superficial con colores amarillos y naranjas. En este caso, se repite la distribución de la pequeña capa somera resistiva y un descenso en profundidad a lo largo de todo el perfil. En este tipo de configuración no se aprecian cambios laterales significativos. El error medio cuadrático obtenido fue de 11.5 %.

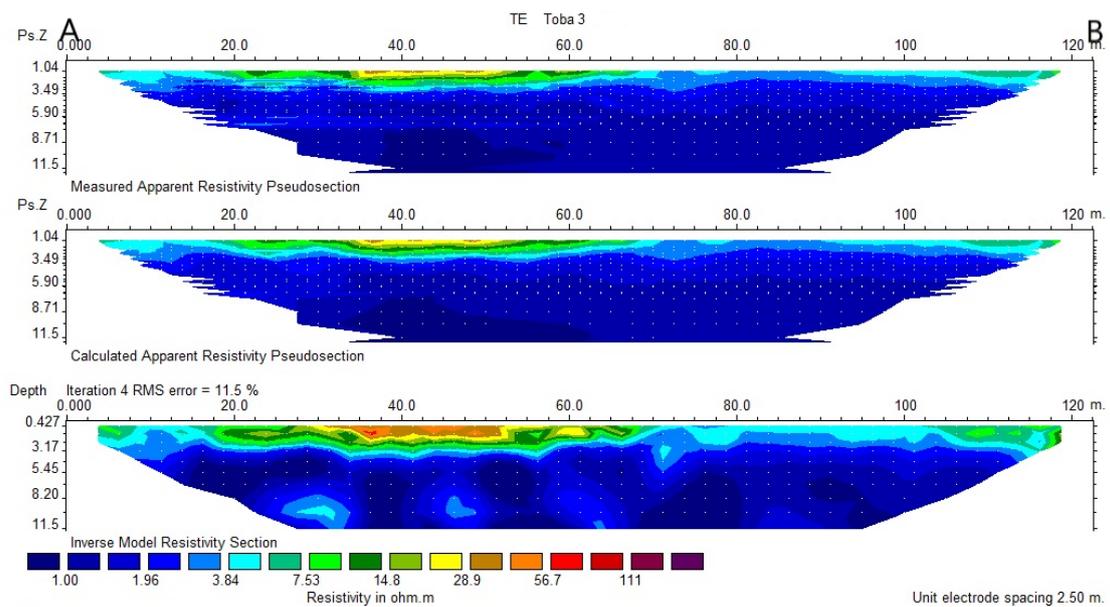


Figura 5.12: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 3.

5.2. Consideraciones generales

En la Figura 5.13 se presentan los modelos obtenidos para las siete tomografías. La escala de resistividades verdaderas se mantiene constante, excepto en TE colegio y TE Toba 3, donde se modificó con el objetivo de obtener una mejor visualización de los datos.

En general, el rango de resistividades varía aproximadamente entre $0.05 \Omega m$ y $600 \Omega m$, a excepción de la tomografía TE colegio donde se detectaron valores de hasta $4000 \Omega m$. En la Tabla 5.1 se muestra la resistividad verdadera máxima y mínima de cada modelo, la cantidad de iteraciones realizadas y el RMS.

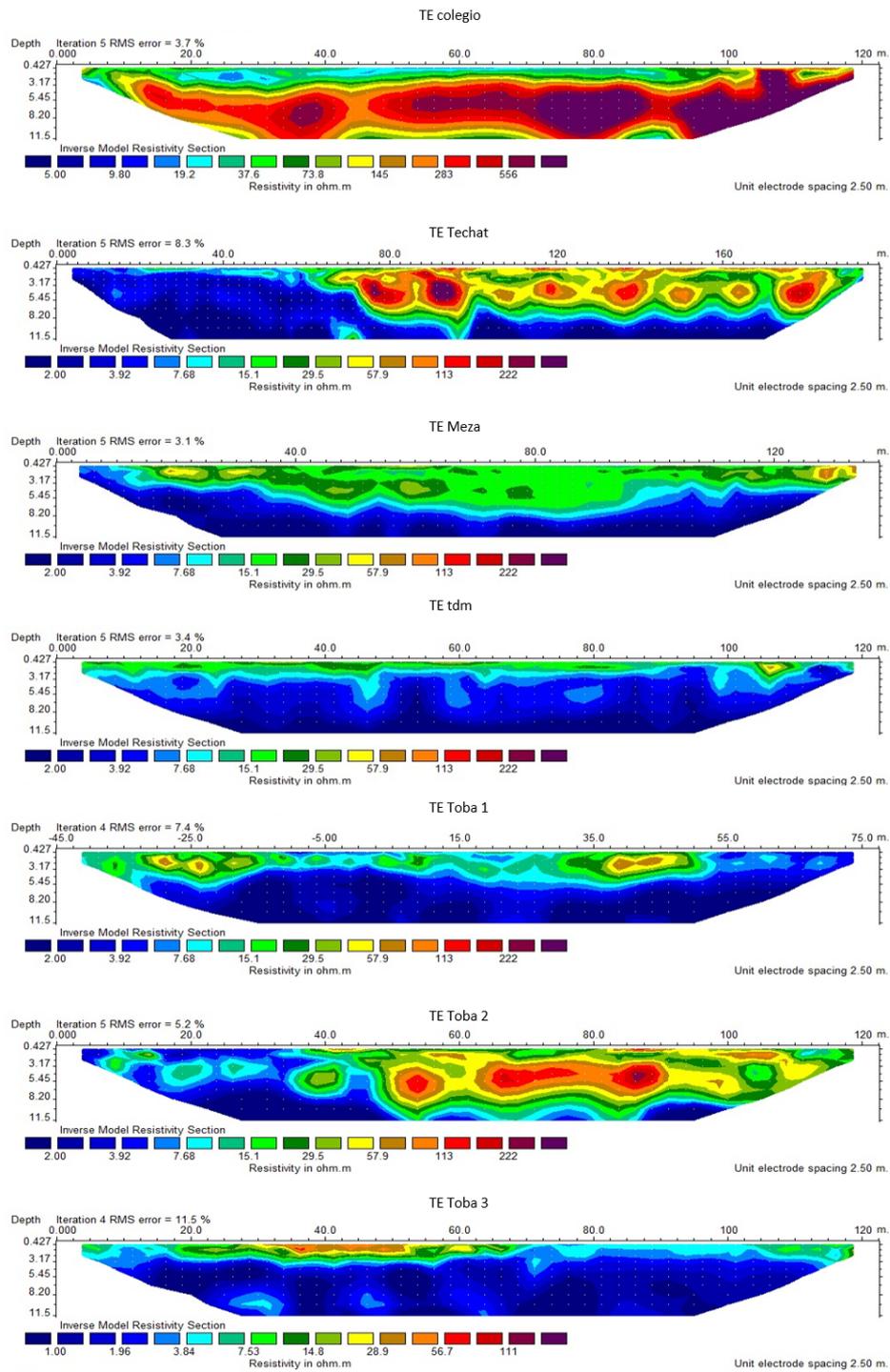


Figura 5.13: Modelos de resistividad eléctrica del subsuelo de las tomografías realizadas.

Tabla 5.1: Valores extremos de los modelos de resistividad eléctrica obtenidos a partir de las tomografías realizadas.

	Resistividad MIN [Ωm]	Resistividad MAX [Ωm]	Iteraciones	RMS [%]
TE colegio	14.01	4307.3	5	3.7
TE Techat	0.059	573.5	5	8.3
TE meza	0.173	91.88	5	3.1
TE tdm	0.408	70.69	5	3.4
TE Toba 1	0.246	85	4	7.4
TE Toba 2	0.203	257.3	5	5.2
TE Toba 3	0.314	65.1	4	11.5

Capítulo 6

Interpretación y análisis

En el Capítulo anterior se presentaron los resultados y se comentaron los rasgos más importantes de los modelos de resistividad verdadera. En el presente Capítulo, se realiza una interpretación cualitativa de los mismos. El objetivo principal de estas tomografías es identificar la transición en el subsuelo entre los paleocauces y el entorno a través de la distribución de resistividades. Por otra parte, los resultados fueron utilizados como parte de los criterios para decidir la locación de perforaciones en los sitios con mayor probabilidad de encontrar agua dulce.

A partir de la información recopilada, se puede sintetizar que el área de estudio está compuesto por material fino, de tipo arcilloso o limo-arcilloso denominado loess. El nivel freático se encuentra entre los 5 y 12 metros de profundidad. La presencia de agua y sales influye directamente en los valores que toma la resistividad en el subsuelo. Estas arcillas y limos están caracterizadas por presentar un rango de resistividades bajo, debido a que en su mayor proporción contienen agua salobre. En cambio, los paleocauces de la región están formados por arenas que fueron arrastradas por antiguos afluentes de los ríos de la región. Estos sedimentos son más permeables y propensos a almacenar agua de lluvia. Suelen presentar un rango de resistividades mayor que el terreno circundante.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se pueden detectar fuertes contrastes de resistividades. A continuación, se analiza individualmente cada una de las tomografías. En los lugares donde se realizaron perforaciones se anexa la información del subsuelo obtenida.

6.1. Análisis individual de los resultados

TE colegio

Como puede observarse en la Figura 5.2 la tomografía presenta contrastes de resistividad de dos órdenes de magnitud. Se decidió realizar una perforación que se ubicó sobre la progresiva que se ubicó sobre la progresiva de 84 metros. En la Figura 6.1 puede observarse su localización. En la Figura 6.2 se presenta el perfil de perforación. En la imagen dentro del perfil se aprecian las muestras de suelo extraídas de la perforación. En la Figura 6.3 se aprecia la tomografía, con la columna litológica obtenida a partir de las muestras. Los primeros 9 metros se componen de una arena fina parda no saturada donde se registra resistividad creciente, que luego cambia a una arena fina gris acompañado por un descenso de resistividad. Se midió el nivel freático a los 9.3 metros y se obtuvo un valor de conductividad del agua de 0.3 mS (agua dulce). Puede observarse una buena correlación entre el cambio litológico, el cambio de resistividades y la presencia del nivel freático.



Figura 6.1: Ubicación de la perforación realizada (Google Earth).

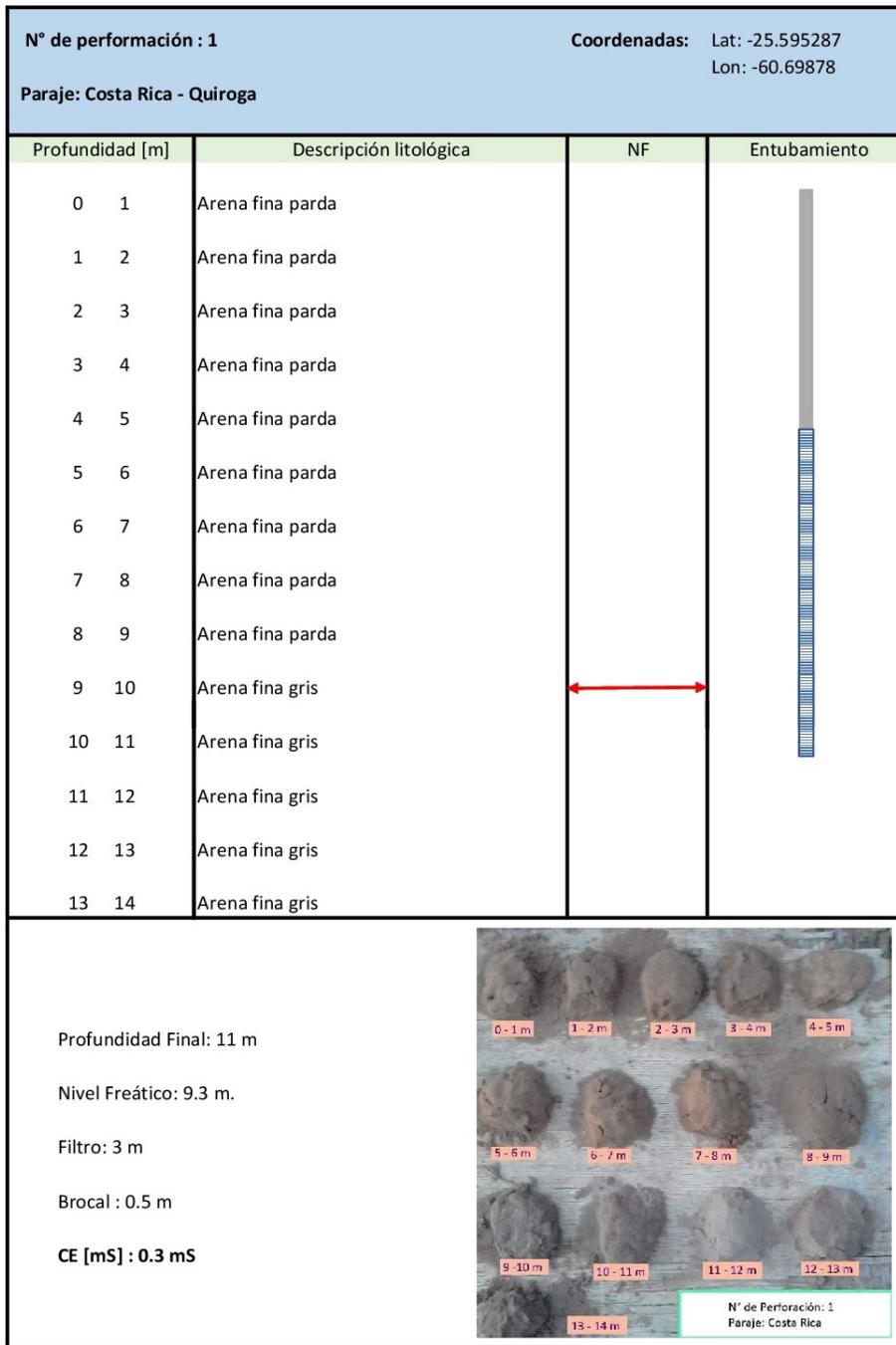


Figura 6.2: Perfil litológico realizado con información de pozo.

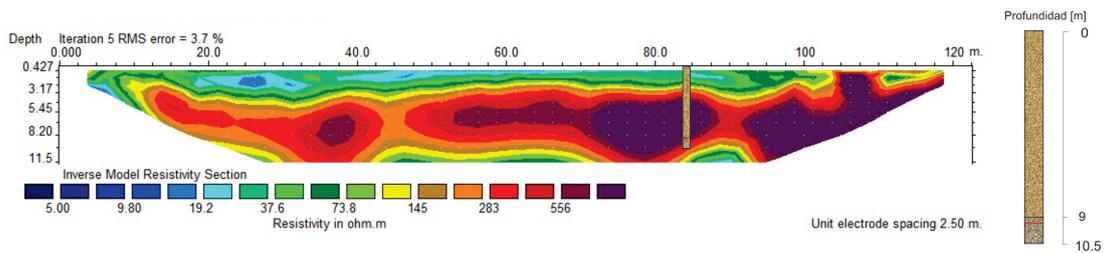


Figura 6.3: Correlación del modelo de resistividad verdadera y la perforación realizada.

TE Techat

En este caso, se observó en el campo una transición en superficie sobre la horizontal de un sedimento arcilloso de textura más compacta a la de un sedimento de tipo arenoso. Esta observación se puede correlacionar con el cambio abrupto de resistividades en el modelo obtenido, cerca de la progresiva de 60 metros (Figura 6.4). Este contraste lateral en superficie parecería extenderse en profundidad. La forma de la estructura y el contraste de resistividades coincide con lo esperado para los paleocauces de la región. Las resistividades más bajas del sector izquierdo se vinculan al sedimento arcilloso y el aumento de resistividad en el sector derecho, al arenoso. Las resistividades más altas podrían asociarse al sedimento arenoso no saturado. Se propuso realizar una perforación en esta locación entre las progresivas de 90 y 95 metros. Sin embargo, este estudio no se pudo concluir debido a dificultades de acceso del vehículo que transportaba la maquinaria de perforación.

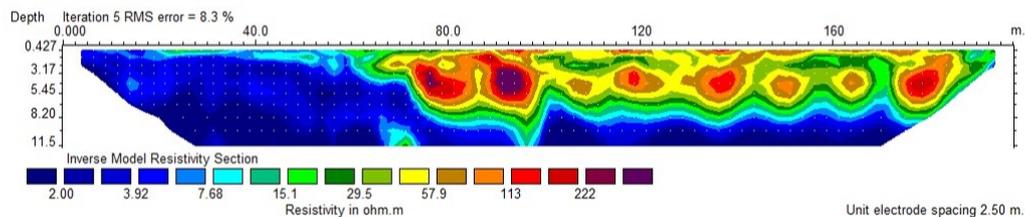


Figura 6.4: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Techat.

TE Meza

Esta tomografía presenta una primera capa de mayor resistividad (Figura 6.5). La profundidad de la misma aumenta hacia el centro de la tomografía y podría vincularse con un posible paleocauce aflorante. Luego, a lo largo de toda la sección y variando la profundidad desde los 2 hasta los 8.5 metros, la resistividad disminuye de manera abrupta, indicándonos una posible transición al sedimento más conductivo. Sin embargo, no se decidió realizar una perforación en esta locación, por la lejanía de las viviendas y comunidades que pudiesen abastecerse de una posible perforación.

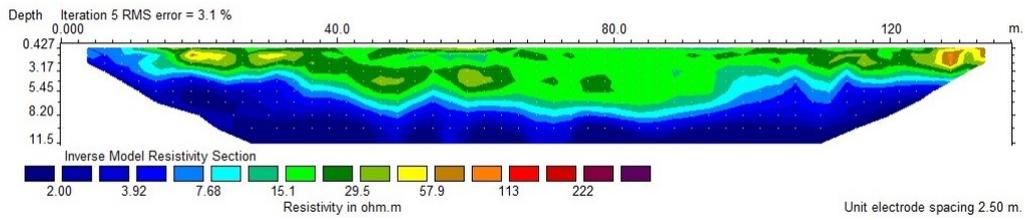


Figura 6.5: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Meza.

TE tdm

En esta tomografía puede observarse una primera capa de espesor variable que no supera los 5 metros (Figura 6.6). Esta zona superficial resistiva toma valores promedio de $20 \Omega m$. Luego, la resistividad desciende a lo largo de toda la sección. No se observaron aumentos de resistividad en profundidad ni transiciones laterales que pudieran indicar la presencia de sedimento de paleocauce. Por lo tanto, podría interpretarse como una sección de sedimento arcilloso con agua salobre.

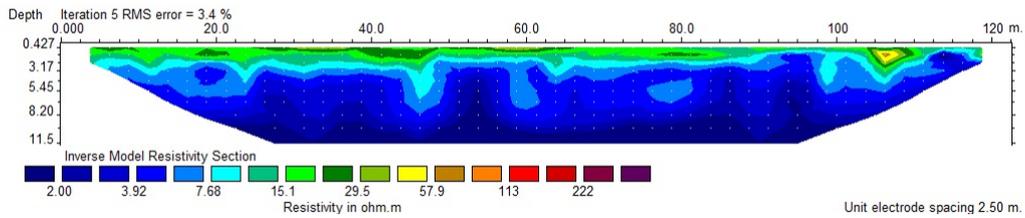


Figura 6.6: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE tdm.

TE Toba 1

La primera de las tres tomografías (Figura 5.9) en esta zona abarcó la transición de un sector sin vegetación, a un sector con vegetación cerrada. Al observarse un aumento de resistividad al ingresar en la zona con vegetación, se realizaron dos roll-along en sentido negativo del eje horizontal, esperando continuar observando un aumento de resistividad. Se debió detener el corrimiento, ya que en la progresiva de -10 metros el suelo comenzó a presentar saturación de agua en superficie y entre las progresivas de -30 y -40 metros el nivel de agua y barro no permitía proseguir.

Se decidió realizar una perforación sobre el camino, a 55 metros de la tomografía, para poder estudiar las anomalías más resistivas. Se ubicó a la altura de la progresiva de -23 metros como puede observar en la Figura 6.7. El perfil de perforación se muestra en la Figura 6.8, y en la Figura 6.9, la tomografía con su correspondiente columna litológica. Puede detectarse un cambio de sedimento de arcilla plástica a arena a los 2 metros de profundidad que se correlaciona con un aumento de resistividad. El nivel freático se encontró a los 5 metros. Coincide con una disminución de la resistividad en profundidad, lo cual se corresponde con el alto valor de conductividad del agua medido. Estas características sugieren una transición de la zona no saturada al sedimento saturado con agua salobre.



Figura 6.7: Ubicación del pozo realizado (Google Earth). La tomografía se realizó en sentido Norte-Sur.

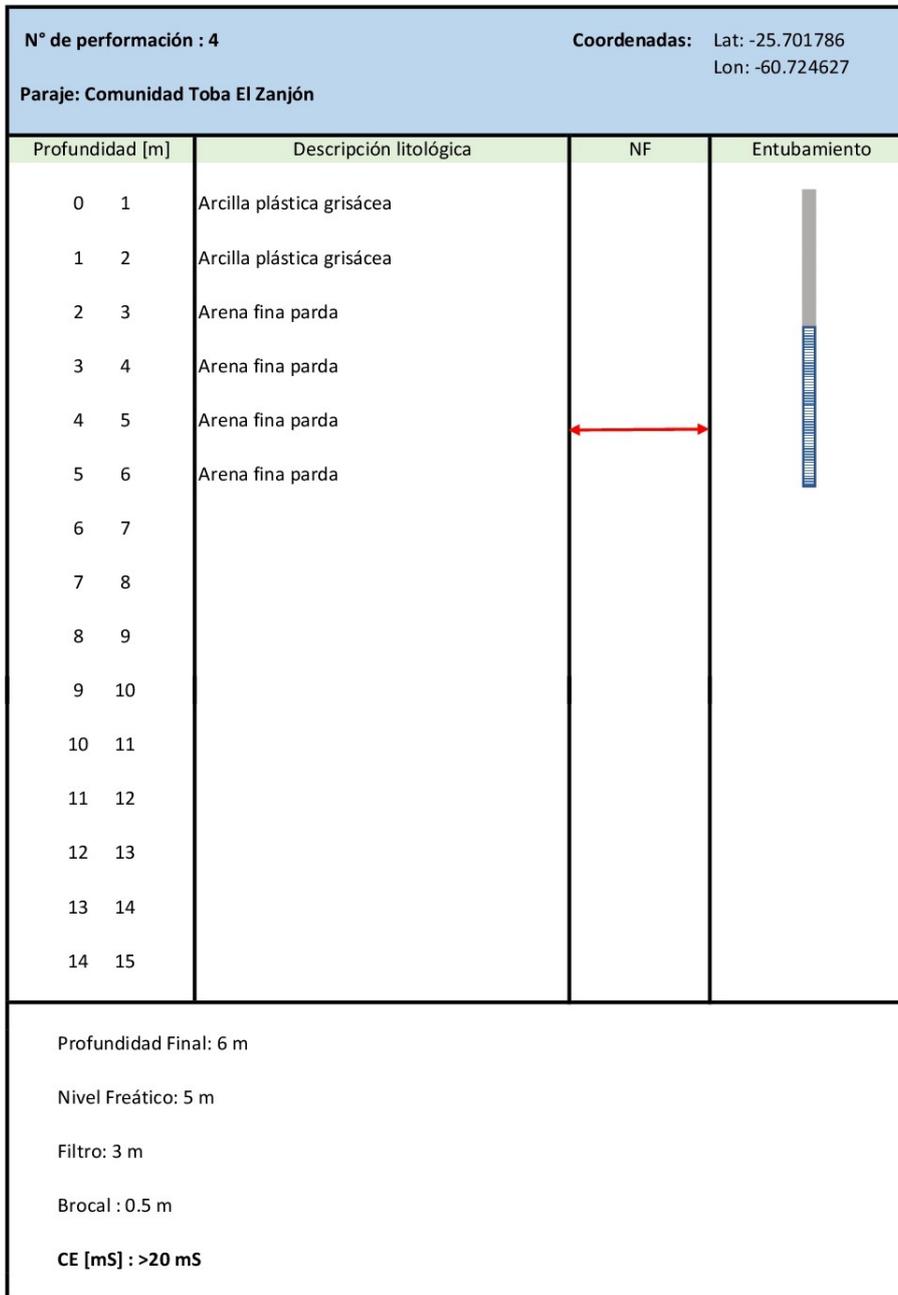


Figura 6.8: Perfil litológico realizado con información de pozo.

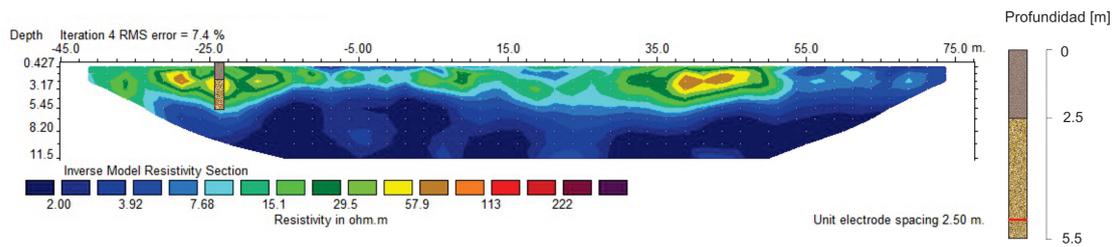


Figura 6.9: Correlación del modelo de resistividad verdadera y la perforación realizada.

TE Toba 2

Esta tomografía se realizó sobre el camino que une la calle principal con la ubicación de la primera tomografía (Toba 1), donde se observó la presencia de una reserva superficial de agua en las proximidades (Figura 6.10). Ésta se ubica entre las progresivas de 65 y 92.5 metros. Puede asociarse en la tomografía con el aumento de resistividades en subsuelo, que produce un notable contraste horizontal (Figura 5.11). Se decidió realizar una perforación en la dirección de la reserva superficial de agua, a 20 metros de la tomografía. En la Figura 6.11, se muestra el perfil de perforación y la columna litológica. A los 4 metros de profundidad se detecta nuevamente un cambio en la litología de arcilla plástica grisácea a arena fina parda, consistente con un aumento de la resistividad a valores que alcanzan los $200 \Omega m$. Estos valores pueden vincularse con sedimento arenoso no saturado de un paleocauce. El nivel freático se midió a los 5.73 metros de profundidad, lo cual coincide con el descenso de resistividad en profundidad. Esta estructura resistiva finaliza aproximadamente a los 10 metros. La conductividad obtenida fue baja, y no se continuó perforando para no ingresar en la zona de baja resistividad, la cual posiblemente esté indicando la presencia de agua salobre.

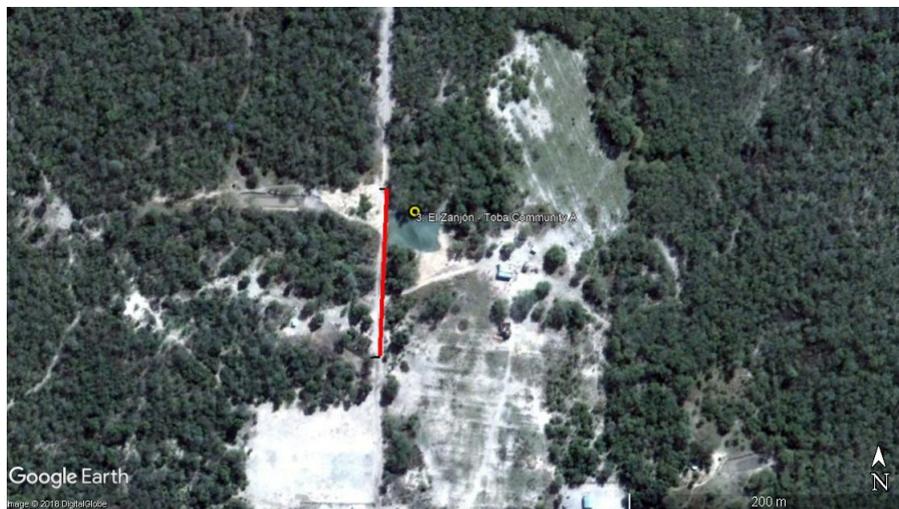


Figura 6.10: Ubicación del pozo realizado (Google Earth).

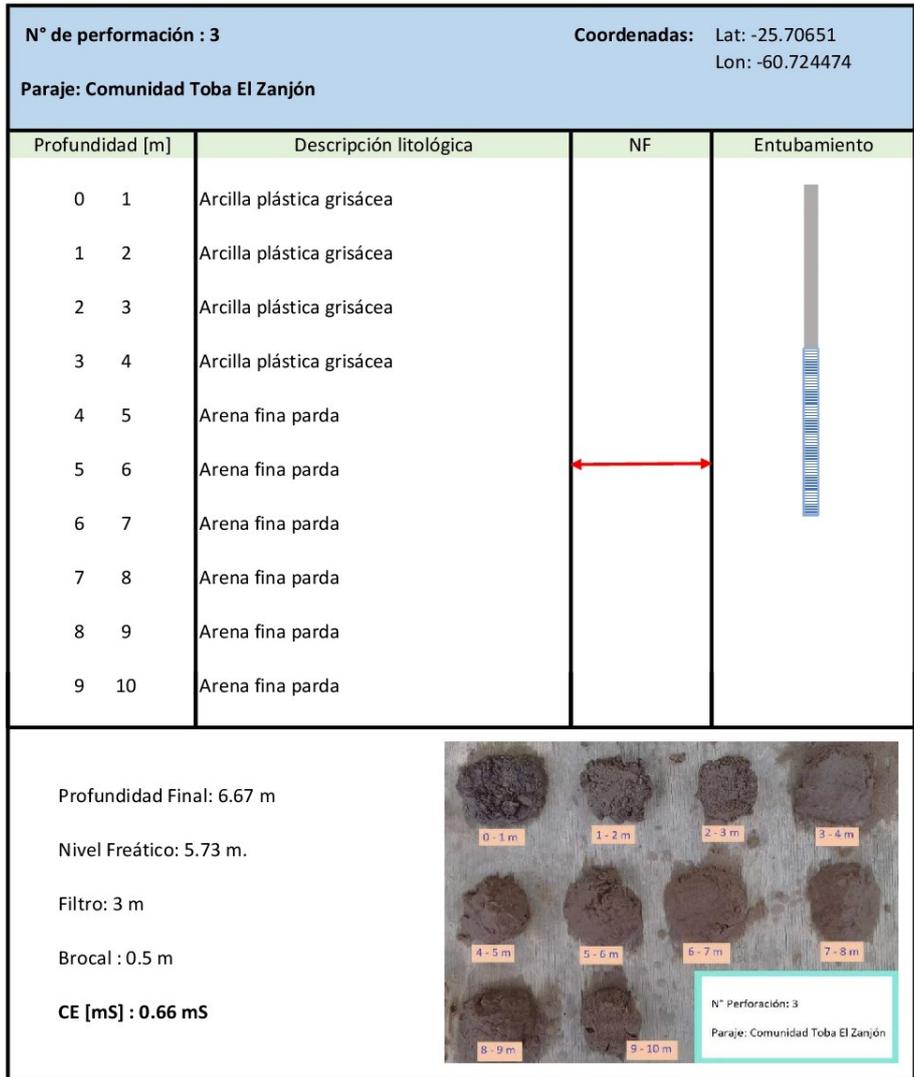


Figura 6.11: Perfil litológico realizado con información de pozo.

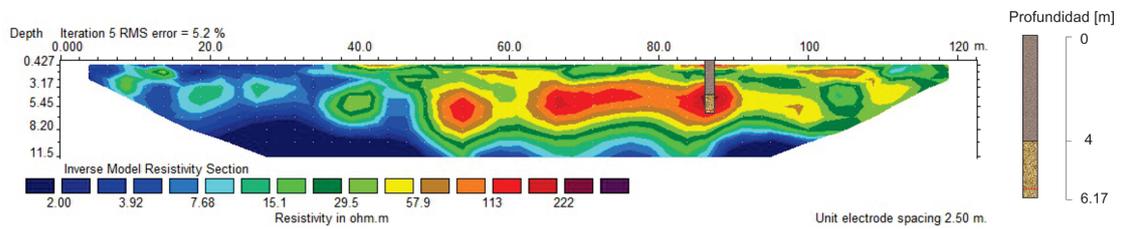


Figura 6.12: Correlación del modelo de resistividad verdadera y la perforación realizada.

TE Toba 3

La última tomografía realizada en la comunidad Toba, se llevo a cabo con el objetivo de estudiar la posibilidad de dejar una perforación sobre la calle principal. Sin embargo, las resistividades obtenidas en el modelo fueron muy bajas. El terreno parece presentar unos primeros 2-3 metros resistivos de suelo superficial, y luego desciende a lo largo de todo el perfil a valores menores a $2 \Omega m$ (Figura 6.13). Se puede interpretar una sección de suelo arcilloso conductivo. Por esta razón no se realizó perforación en este sector.

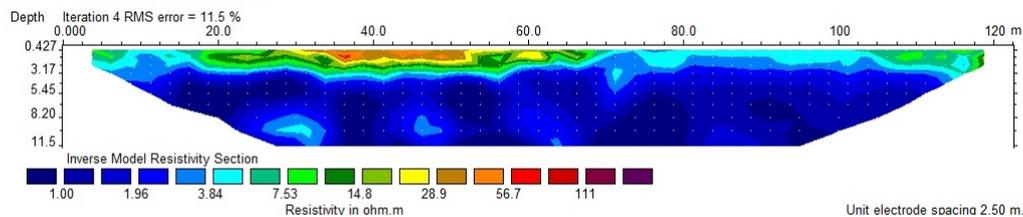


Figura 6.13: Modelo de resistividad obtenido para la tomografía TE Toba 3.

6.2. Análisis general de los resultados

En general, a partir del análisis de los resultados, podemos distinguir dos tipos de patrones en las secciones de resistividad. Algunas presentan un rango de resistividades bajas a lo largo de toda la sección. Estos estudios representan el modelo de subsuelo habitual de la región, compuesto por sedimentos loésicos finos conductivos con presencia de agua con sales, pertenecientes a los grupos Pampiano y Post-Pampiano del Cuaternario. Puede observarse, por ejemplo, en las tomografías TE tdm, TE Toba 1 y TE Toba 3. En todas ellas existe en los primeros 2-3 metros aproximadamente una capa superficial de resistividades de 10 a $100 \Omega m$, y luego un descenso en profundidad a resistividades más bajas que no superan los $10 \Omega m$.

Por otro lado, encontramos tomografías donde existen contrastes de resistividad más importantes, alcanzando valores del orden de $100 \Omega m$ o mayores. Las resistividades no son constantes a lo largo de la sección, sino que por el contrario existen importantes transiciones laterales. Los sectores donde aumenta la resistividad indicarían el cambio hacia un sedimento de grano más grueso o textura arenosa, propio de los paleocauces. En las tomografías TE colegio, TE Techat y TE Toba 2 se observa este patrón.

A partir de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta los rangos de resistividades de las rocas de la Figura 3.2 e integrando la información de las perforaciones, podemos clasificar las resistividades de la zona en tres grupos:

- Resistividades bajas: $0.1-10 \Omega m$;
- Resistividades medias: $10-200 \Omega m$;
- Resistividades altas: mayor que $200 \Omega m$.

Las resistividades más bajas podrían representar el subsuelo arcilloso con agua salobre. El aumento de resistividad puede asociarse a una transición a sedimento arenoso más grueso propio de los paleocauces. Las resistividades intermedias representarían el rango de arenas con mayor probabilidad de contener agua dulce. Mientras que las resistividades altas indicarían el sedimento no saturado. Estos criterios podrían utilizarse a futuro como base para la definición de sitios para realizar más perforaciones.

6.3. Perforaciones

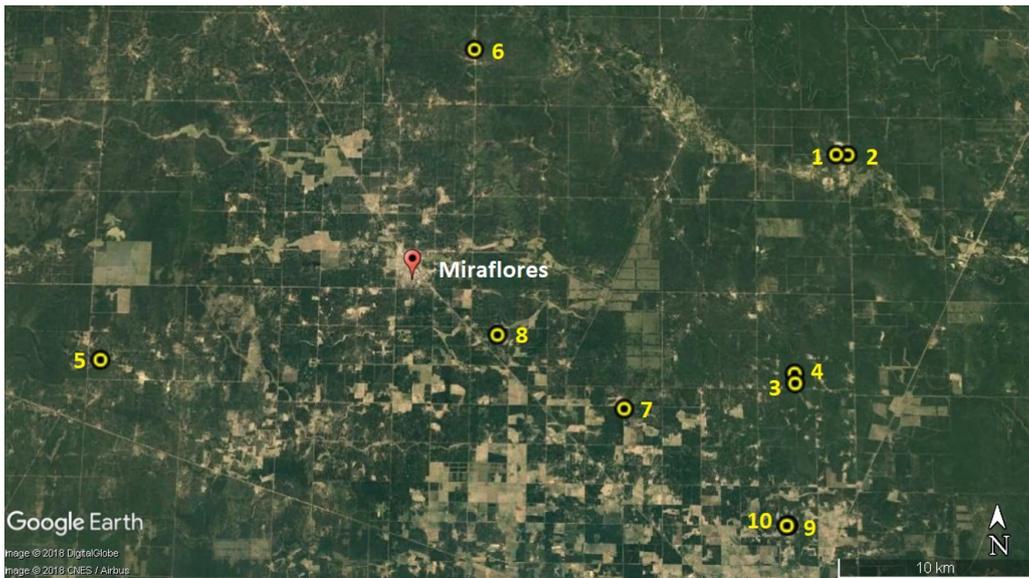
Las ubicaciones de las perforaciones mostradas en esta tesis fueron utilizadas, junto con otras locaciones seleccionadas a partir de los SEVs, para la colocación de 10 bombas manuales. Las mismas fueron instaladas en octubre-noviembre de 2017.

Usualmente los pozos que posee la población en esta región son cavados a mano (Figura 6.14) y se encuentran expuestos, siendo no recomendables desde el punto de vista higiénico. Por esta razón, se decidió realizar perforaciones recubiertas con caños de PVC. Las bombas elegidas para instalar son manuales debido a la falta de suministro eléctrico.

En su mayoría se localizaron en escuelas rurales y comunidades con el objetivo de proveer agua a la mayor parte de habitantes posible de las zonas más afectadas. En la Figura 6.15 se muestra la ubicación de las bombas. En la Figura 6.16 se puede observar el proceso de perforación y en la Figura 6.17 la bomba instalada.



Figura 6.14: Pozo cavado en los alrededores de Miraflores.



1: Costa Rica - Quiroga	6: Comunidad Wichí Techat
2: Costa Rica - Escuela N ° 903	7: Escuela Techat N ° 1074
3: El Zanjón - Comunidad Toba A	8: Familia Gómez
4: El Zanjón - Comunidad Toba B	9: Pozo de Toro - Comunidad Toba
5: San Lorenzo - Escuela N ° 186	10: Pozo de Toro - Escuela N ° 519

Figura 6.15: Ubicación de las bombas instaladas (Google Earth).



Figura 6.16: Proceso de construcción de la base para la colocación de las bombas manuales.



Figura 6.17: Bomba colocada.

Capítulo 7

Conclusiones

El presente trabajo de tesis se enmarcó en el proyecto “*Groundwater resources for small rural and Aboriginal communities in Chaco province, Argentina*”, el cual, a través de los métodos geofísicos, tuvo como objetivo contribuir a la mejora de la situación hídrica en la localidad de Miraflores y sus alrededores. El agua subterránea dulce de la región se encuentra mayoritariamente en viejos cauces de los ríos llamados paleocauces. En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo identificar, a través de tomografías de resistividad eléctrica, las posibles fuentes de agua subterránea en los paleocauces.

A partir del análisis de los datos obtenidos en las primeras campañas y de imágenes satelitales de la zona, se procedió al diseño de un cable multinúcleo que pudiera alcanzar los 10 a 15 metros de profundidad final, con 2.5 metros de distancia entre electrodos. El tendido resultante fue de 77.5 metros.

En la planificación del trabajo de campo se definieron las locaciones de los estudios a realizar. Para ello, se utilizaron imágenes satelitales para restringir la localización de los paleocauces e información de campo, dando prioridad a las comunidades más afectadas. La campaña de medición se realizó en mayo del año 2016 y se midieron un total de siete tomografías. Los estudios fueron realizados principalmente sobre caminos, preferentemente transversales a paleocauces o a transiciones de sedimentos identificados en campo.

A partir de la inversión de los datos, se obtuvieron resultados que mostraron dos patrones de resistividad. Por un lado, las tomografías con rangos de resistividad bajos, las cuales pueden vincularse con el tipo de subsuelo predominante de la región, de sedimento loésico fino y con presencia de agua salobre. Por otro lado, algunas tomografías presentaron importantes contrastes de resistividad horizontales y verticales, donde los valores aumentan notablemente. Este patrón se corresponde con la transición al sedimento grueso de las geoformas de los paleocauces observado en campo y en las muestras de suelo recabadas en las perforaciones realizadas.

Los estudios fueron utilizados para la localización de perforaciones y posterior colocación de bombas manuales. En general, se detectó buena correlación entre los modelos de resistividad y la descripción litológica de las perforaciones. Los valores bajos de resistividad ($0.1-10 \Omega m$) se corresponden a los sedimentos loésicos finos con agua salobre, los valores intermedios ($10-200 \Omega m$) al acuífero de agua dulce y valores altos (mayor que $200 \Omega m$) a la zona no saturada.

Los resultados obtenidos ayudaron a comprender la hidrogeología local. En este sentido, se concluye que las únicas fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la zona las constituyen los paleocauces. La técnica utilizada resulta adecuada para identificar estos recursos, siendo posible replicar los estudios en otras zonas con características hidrogeológicas similares.

A futuro, se proyecta realizar análisis de la calidad del agua extraída de los pozos. Según estos

resultados, el agua podrá ser utilizada para consumo o uso sanitario. El acceso al agua potable y al saneamiento fueron declarados como un derecho humano el 28 de julio de 2010, a través de la Resolución 64/292 de la Asamblea General de las Naciones Unidas.

Bibliografía

Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62.

Ainchil G. (2015). *Apuntes de Cátedra. Métodos Eléctricos de Prospección*. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - Universidad Nacional de La Plata.

Basterra, N. I. (2004). Aproximación a la caracterización del paisaje del Impenetrable chaqueño. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004*, Universidad Nacional del Nordeste.

Batayneh, A. T. (2006). Use of electrical resistivity methods for detecting subsurface fresh and saline water and delineating their interfacial configuration: a case study of the eastern Dead Sea coastal aquifers, Jordan. *Hydrogeology Journal*, 14(7), 1277-1283.

Bonini, L., Herrero Ducloux, J.J., Hurtado, H. (1977a). *Prospección Geofísica con fines hidrogeológicos en la región occidental de la Provincia del Chaco*. Informe Preliminar N 3. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas.

Bonini, L., Hurtado, H., Daffinoti, O. (1977b). *Prospección Geofísica con fines hidrogeológicos en la región central de la Provincia del Chaco (Picada Olmos 3ra. parte y picada YPY 44052)*. Informe Preliminar N 5. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas.

Chirindja, F. J., T. Dahlin, N. Perttu, F. Steinbruch, R. Owen, 2016. Combined electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding investigation of the surface water/groundwater interaction in the Urema Graben, Mozambique, *Hydrogeol J* 24:1583–1592.

Edwards, L. S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42(5), 1020-1036.

Fuertes, A. (2004). Programa marco para la gestión sostenible de los recursos hídricos de la cuenca del Plata en relación con los efectos hidrogeológicos de la variabilidad y el cambio climático, Caso de estudio sistema acuífero Yrenda-Toba-Tarijeno Paraguay-Argentina-Bolivia. UNESCO/OEA/ISARM/AMERICAS, INASLA.

Golub, G.H. and van Loan, C.F. (1989). *Matrix computations*. The John Hopkins Un. Press.

Gonzalez Arzac R., et al. (1994). Programa APAC: “Agua Potable para pequeñas comunidades: Generalidades”. Consejo General de inversiones, Provincia de Mendoza.

González N., Kruse E., Trovatto M. M., Laurencena P. La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. p45 - 50. isbn 978-987-1985-03-6.

Guarracino, L. (2017). Status report of the project “Groundwater resources for small rural and aboriginal communities in Chaco Province, Argentina”, GWB-SEG, 16 páginas.

Guarracino, L., Amaya, M., Perdomo, S., Juarez, A., Gelpi, G., Pendiuk, J., Lagos, S., Gómez, J. (2018). Identification and evaluation of groundwater resources for small rural and aboriginal communities in Chaco, Argentina. Abstract presented at the SEG Annual Meeting 2018, Anaheim, USA.

Loke, M. H. (1996-2016). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Loke, M.H. and Barker, R.D. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, 1682-1690.

Mastrocicco, M., Vignoli, G., Colombani, N., & Zeid, N. A. (2010). Surface electrical resistivity tomography and hydrogeological characterization to constrain groundwater flow modeling in an agricultural field site near Ferrara (Italy). *Environmental Earth Sciences*, 61(2), 311-322.

Martínez, D. E., & Osterrieth, M. (2013). Hidrogeoquímica y efectos de la contaminación en un acuífero en sedimentos loésicos cuaternarios en el área de rellenos sanitarios de Mar. del Plata, Argentina. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 66, 9-23.

Nassir, A.S.S., Loke, M.H., Lee, C.Y. and Nawawi, M.N.M. (2000) Salt–water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys, *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, pp. 647–661.

Nowroozi, A. A., Horrocks, S. B and Henderson, P. 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*, 42, pp. 1–22.

Orellana, Ernesto (1982). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Madrid, España.

Perdomo Santiago, Carretero Silvina, Ainchil Jerónimo, Kruse Eduardo, 2011. Caracterización geoeléctrica en lentes de agua dulce de la zona costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Argentina. Buenos Aires. Congreso. VII Congreso de Hidrogeología.

Perdomo, S., J. E. Ainchil, E. E. Kruse, J. Nigro, M. Tessone, S. Lagos, M. Pensa, 2013a. Resistividad eléctrica y cargabilidad del acuífero Puelche en La Plata, Provincia de Buenos Aires, VIII Congreso de Hidrogeología, 7 páginas.

Perdomo, S., Rodríguez Capítulo, L., Kruse, E., Ainchil, J., 2013b. Aplicación de tomografías eléctricas en la configuración del acuífero costero en un sector oriental de la Prov. de Buenos Aires, VIII Congreso de Hidrogeología, 6 páginas.

Perdomo Santiago, Carretero Silvina, Kruse Eduardo, Ainchil Jeronimo ,2013c. Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita (Prov de Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos. En: *Temas actuales de la hidrología subterránea 2013*.

Ramos, V. A. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*, 29(3), 41-96.

Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente. ASAGAI. vol. N37. p77 - 87.

Rolleri, E.O. (1976). Sistema de Santa Bárbara. 6to Congreso Geológico Argentino, Actas1: 240-255.

Rossello, E. A., & Veroslavsky, G. (2012). Definición del límite occidental del Sistema Acuífero Guaraní (Gran Chaco, Argentina): ¿técnico o convencional?. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3), 297-310.

Ruiz María S., Perdomo Santiago, Calahorra Fuertes Patricia, Ainchil Jeronimo, Villareal Julio (2016). Caracterización geoelectrica, hidrodinámica e hidroquímica del acuífero pampeano y su relación con el arroyo Pergamino, provincia de Buenos Aires. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente. ASAGAI. vol. N 37. p77 - 87*

Sayago, J. M., Collantes, M. M., Karlson, A., & Sanabria, J. (2001). Genesis and distribution of the Late Pleistocene and Holocene loess of Argentina: a regional approximation. *Quaternary International*, 76, 247-257.

Teruggi, M. E. (1957). The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Research*, 27(3), 322-332.

Tiddi, R., Heinonen, S., Quiroga, V. y López, L. (2014). Parque Nacional El Impenetrable—Participación y Aportes para su Creación. http://www.impenetrableparquenacional.org/descargas/Parque_Nacional_El_Impenetrable.pdf.

World Health Organization (2011). Fourth edition. Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*, 38(4), 104-8.

Agradecimientos

A mi director y co-director, Dr. Santiago Perdomo y Dr. Luis Guarracino, por guiarme y por sus aportes en este trabajo.

A los alumnos y graduados de la facultad que participaron en las campañas de medición.

A la comunidad de Miraflores, en especial a la familia de José Gómez, que nos abrió los brazos cada vez que viajamos.

A Geoscientists Without Borders por permitirnos llevar adelante este proyecto.

Por estos años, por esta etapa que culmina:

A mi papá, mi mamá y mi hermana, que me transmitieron el respeto, la voluntad y la alegría con las que la transité. Siempre presentes, me enseñaron a nunca bajar los brazos, ni la sonrisa.

A mis tíos, primos y abuelos, que siempre me alentaron y motivaron con mucho cariño.

A Eze, por su apoyo incondicional e inmensa fuerza.

A mis amigos de la facultad, por lo infinito compartido en este camino juntos.

Al hockey y las grandes amigas que me dio, quienes representaron un indispensable y hermoso cable a tierra.

À mes compagnons canadiens pour l'enrichissement culturel et intellectuel partgés pendant mon stage.

A los profesores y alumnos que me acompañaron en el crecimiento académico y personal.

A la Universidad Nacional de La Plata y la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, por brindarme no sólo una formación de excelencia pública y gratuita, sino también un espacio de aprendizaje y desarrollo.

Todos ustedes son pilares y arquitectos en esta construcción,

¡Gracias totales!