



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Lineamientos para realizar actividades de exploración Hidrogeofísica

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Cruz Esteban Sandoval Sandoval

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
OFICIO/FING/DICT/0177/2019

SR. CRUZ ESTEBAN SANDOVAL SANDOVAL
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación: **POR TESIS**, así como el tema y contenido propuestos por el Ing. Alejandro Arroyo Carrasco en calidad de **Director de Tesis**, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de Ingeniería Geofísica y se muestran a continuación

LINEAMIENTOS PARA REALIZAR ACTIVIDADES DE EXPLORACIÓN HIDROGEOFÍSICA

- I INTRODUCCIÓN
- II EXPLORACIÓN HIDROGEOFÍSICA
- III EQUIPOS DE EXPLORACIÓN HIDROGEOFÍSICA MÁS UTILIZADOS EN MÉXICO
- IV ADQUISICIÓN
- V PROCESAMIENTO DE DATOS
- VI INTERPRETACIÓN
- VII INTEGRACIÓN
- VIII RESULTADOS
- IX PROPUESTA DE LINEAMIENTO
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

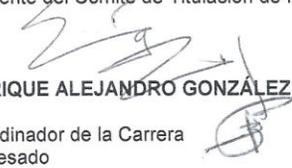
Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la réplica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

PRESIDENTE: DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE
VOCAL: ING. ALEJANDRO ARROYO CARRASCO
SECRETARIO: M.C. DAVID ESCOBEDO ZENIL
1ER. SUPLENTE: ING. ALEJANDRO GARCÍA SERRANO
2DO. SUPLENTE: ING. THALIA ALFONSINA REYES PIMENTEL

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 20 de febrero 2019.
El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geofísica


DR. ENRIQUE ALEJANDRO GONZÁLEZ TORRES

ccp Coordinador de la Carrera
ccp Interesado

Agradecimientos y dedicatorias

Esta tesis está dedicada a mis padres Patricia y Esteban y hermano Toño que tanto me han apoyado, guiado y ayudado en este largo camino y ser el pilar principal de mi vida.

Agradezco especialmente al **Ingeniero Alejandro Arroyo Carrasco**, mi asesor, por ser una gran persona y profesionalista, por compartir todo su conocimiento, por todo el tiempo que me dedicó en la presente tesis y por trasmitirme el gusto hacia la geofísica de exploración y por siempre impulsarme a aprender más y seguir preparándome.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos de la carrera, todas esas experiencias y conocimiento que juntos fuimos adquiriendo, por todos esos tropiezos que tuvimos y que con unas cuantas horas en la biblioteca los logramos superar, por todas las risas y aventuras que tuvimos.

Agradezco también a mis profesores de la facultad ya que sin su conocimiento, clases y ayuda no habría podido completar este trabajo, al **Doctor Antonio Uribe Carbajal**, al **Ingeniero Roberto Uribe Afif** que gracias a ellos tuve un punto de vista diferente de lo que hace un ingeniero.

Dedico y agradezco de manera especial a la **Maestra Verónica Angélica Cabrera Camarillo**, sus clases, conocimiento y tiempo dedicado y que gracias a todo eso y a ella comprendí y entendí lo que es y hace una persona profesionalista, el compromiso que tiene con los demás, con la sociedad y lo más importante, el compromiso con uno mismo, pero sobre todo por hacer su trabajo con tanta pasión y dedicación, todo eso se contagia. Esas clases jamás serán olvidadas

A mis sinodales por brindarme su tiempo y apoyo en la revisión de esta tesis y por sus contribuciones para poder mejorarla.

Y finalmente a mi casa de estudios, mi alma mater, la **Universidad Nacional Autónoma de México** por todo el conocimiento que fui adquiriendo dentro de sus aulas, laboratorios, bibliotecas, institutos y por todas las practicas que me permitió realizar.

Resumen

Con base en la recopilación y análisis de muchos estudios de geofísica enfocados al área de la **hidrogeología** y las experiencias adquiridas, se plantean los lineamientos que debe tener cualquier estudio de exploración geofísica en esta rama de conocimiento.

El trabajo tiene como prioridad normalizar las actividades geofísicas que se realizan en el área de la hidrogeología desde la planeación, adquisición de datos, procesamiento, integración y hasta la definición de resultados, así como las medidas de seguridad que deben tomarse en cuenta en lo relativo al medio ambiente y al personal que realiza los trabajos de campo.

Con base en lo anterior se plantea el término Hidrogeofísica dado que el objetivo es la identificación de propiedades relacionadas con la porosidad y permeabilidad; sin embargo, como es sabido, salvo en el área de registros de pozos y actualmente en etapa de prueba la resonancia magnética, no existen métodos indirectos que determinen cuantitativamente estos parámetros.

El uso de la geofísica en la hidrogeología ha venido tomando interés por muchos investigadores y técnicos ya que los retos que demanda el abastecimiento de agua a pequeñas y grandes poblaciones, la identificación y distribución de la calidad o contaminación del agua subterránea, la definición de la intrusión marina, la conexión entre acuíferos y la detección de acuitardos; así como también la identificación de estructuras geológicas con potencial hidráulico, su aplicación en la geotermia, la distribución de algunas propiedades hidrogeológicas y riesgo hidrogeológico. Hay que aclarar que **no es el agua subterránea en sí misma el objetivo de la geofísica, sino la situación geológica en la que se presenta el agua.**

Este trabajo está orientado a plantear: el proceso de la exploración Hidrogeofísica, los elementos mínimos necesarios que deben considerarse cuando se realicen trabajos relacionados con la Hidrogeofísica, para que los responsables de los proyectos sepan qué tipo de método geofísico emplear, cuáles son sus bondades y limitaciones; así como el diseño de adquisición de datos, él o los procesamientos que deben aplicarse a los datos adquiridos, la interpretación e integración de la información para llegar a un buen resultado. En cada fase del proceso de exploración se describe la metodología que debe emplearse. También hay que aclarar que sólo se considera en este trabajo tres técnicas geofísicas: SEV, TER y TEM, por estar más relacionadas con la conductividad eléctrica la cual puede correlacionarse con la conductividad hidráulica y se deja como área de oportunidad la integración de todas las demás técnicas geofísicas; aunque se hace mención de algunos resultados que han apoyado también a la definición de las condiciones hidráulicas del subsuelo.

El trabajo se divide en diez capítulos. El primero de Introducción donde se da el motivo, objetivos, nivel de caracterización de los estudios de Hidrogeofísica, así como los alcances del trabajo.

El segundo capítulo, Exploración Hidrogeofísica, se expone el proceso donde se hace hincapié en tres acciones: **conceptualizar, caracterizar y concretar** para el logro de los objetivos propuestos en los planteamientos de los estudios. Se presenta la clasificación de los métodos geofísicos más usados en la hidrogeología, sus alcances y sus limitaciones. Sobre estos dos términos se plantean cinco preguntas que siempre son necesarias resolver en cada proyecto donde esté relacionada la Hidrogeofísica.

En el capítulo tres se presentan los equipos y softwares más utilizados, específicamente en México.

El capítulo cuatro se presenta y describe el proceso de adquisición de las tres técnicas geofísicas, con el detalle necesario para entender las actividades que deben realizarse. Se habla de proceso

estocástico el cual es el comportamiento que tienen las señales relacionadas con las técnicas geofísicas que se mencionan en este trabajo. Para cada técnica se describe de manera sucinta el principio físico, la forma de acomodar los electrodos o bobinas de medición, el número de mediciones que debe tener cada medición, apilamiento, profundidad de investigación, fuentes de error y ruido ocasionado por fuentes externas. Se menciona, también en forma breve, los otros métodos geofísicos (magnético, gravimétrico, sísmicos, polarización inducida, radar, magnetotelúrico, y audio magnetotelúrico de fuente controlada). Cabe mencionar que no se habla de la geofísica de detalle cómo es la de registros geofísicos de pozos. Se menciona también la necesidad de realizar calibraciones de la información adquirida y la georreferenciación de las mediciones; así como también los tipos de formatos que se utilizan para guardar y grabar la información adquirida.

El capítulo cinco plantea y describe el procesamiento que debe aplicarse a las técnicas de SEV, TER y TEM. En cada una de ellas se hace una descripción detallada, no con el detalle matemático, pero sí con la descripción necesaria para que los usuarios que no están muy familiarizados con la Hidrogeofísica entiendan qué debe realizarse y qué debe obtenerse. Se presenta una relación del software más utilizado en México, se describe también en forma sucinta las formas en que pueden realizarse esta actividad, así como el proceso. Se hace un espacio para describir el análisis estadístico que se realiza a las señales de las técnicas ya mencionadas. Se habla del modelo directo e inverso como una herramienta para descifrar las estructuras que se encuentran en el subsuelo.

En el capítulo seis se muestra el proceso de interpretación donde se describen las anomalías obtenidas del procesamiento de los datos.

El capítulo siete se habla de la integración de los datos, donde confluye toda la información geográfica, geológica, hidrológica, hidrogeológica y geofísica que permita llegar a una caracterización de las condiciones que presenta el agua subterránea en el sitio evaluado.

El capítulo ocho indica la forma en que deben plasmarse los resultados obtenidos ya sea en un texto escrito o en un archivo digital. Se habla de los datos, información y conocimiento explícito que debe entregarse. Se plantea un formato de presentación de resultados.

En el capítulo nueve se presentan los lineamientos que deben realizarse en cualquier estudio de Hidrogeofísica, el cual es una síntesis de lo que debe realizarse en cada parte del proceso de exploración Hidrogeofísica descrito en los capítulos anteriores. Cabe mencionar que están organizados de acuerdo a la norma Mexicana NOM.

En el capítulo diez se presentan las conclusiones y áreas de oportunidad que se plantean con este trabajo.

Este trabajo está abierto para su mejora y para que otros especialistas aporten sus conocimientos afinando los Lineamientos presentados, así como ampliando las otras técnicas geofísicas que se pueden aplicar en el área de la hidrogeología.

Abstract

Based on the compilation and analysis of many geophysical studies focused on the area of hydrogeology and the acquired experiences, the guidelines that any study of geophysical exploration in this branch of knowledge should have are presented.

The work has as a priority to normalize the geophysical activities that are carried out in the area of hydrogeology from planning, data acquisition, processing, integration and even the definition of results, as well as how security measures should be considered in what concerns the environment and the personnel who carry out the field work.

Based on the above, the term Hydrogeophysics is proposed since the objective is the identification of properties related to porosity and permeability; however, as is known, except in the area of well logs and currently undergoing magnetic resonance testing, there are no indirect methods that quantitatively determine these parameters.

The use of geophysics in hydrogeology has been taking interest in many researchers and technicians since the challenges that demand water supply to small and large populations, the identification and distribution of the quality or contamination of groundwater, the definition of the marine intrusion, the connection between aquifers and the detection of aquitards; as well as the identification of geological structures with hydraulic potential, their application in geothermal energy, the distribution of some hydrogeological properties and hydrogeological risk. It must be clarified that it is not the groundwater itself that is the objective of geophysics, but rather the geological situation in which water is presented.

This work is aimed at proposing: the Hydrogeophysical exploration process, the minimum necessary elements that must be considered when carrying out works related to Hydrogeophysics, so that those responsible for the projects know what kind of geophysical method to use, what are their benefits and limitations; as well as the design of data acquisition, he or the processing that should be applied to the acquired data, the interpretation and integration of the information to reach a good result. In each phase of the exploration process, the methodology that should be used is described. It is also necessary to clarify that only three geophysical techniques are considered in this work: SEV, TER and TEM, since they are more related to electrical conductivity which can be correlated with hydraulic conductivity and the integration of all the rest is left as an area of opportunity geophysical techniques; although mention is made of some results that have also supported the definition of the hydraulic conditions of the subsoil.

The work is divided into ten chapters. The first of Introduction where the reason, objectives, level of characterization of Hydrogeophysics studies, as well as the scope of the work is given.

The second chapter, Hidrogeophysical Exploration, exposes the process where three actions are emphasized: conceptualize, characterize and concretize for the achievement of the proposed objectives in the approaches of the studies. The classification of the most used geophysical methods in hydrogeology, its scope and limitations are presented. On these two terms there are five questions that are always necessary to solve in each project where Hydrogeophysics is related.

In chapter three the most used equipment and software are presented, specifically in Mexico.

Chapter four presents and describes the process of acquisition of the three geophysical techniques, with the necessary detail to understand the activities that must be carried out. We speak of the stochastic process, which is the behavior of the signals related to the geophysical techniques mentioned in this work. For each technique, the physical principle is described, the way to accommodate the electrodes or measuring coils, the number of measurements each measurement must have, stacking, depth of investigation, sources of error and noise caused by external sources. Other geophysical methods (Magnetic, Gravimetric, Seismic, Induced Polarization, Radar, Magnetotelluric, and magnetotelluric audio from a controlled source) are also mentioned briefly. It is worth mentioning that there is no mention of detailed geophysics such as geophysical well logs. The need to calibrate the acquired information and the georeferencing of the measurements is also mentioned; as well as the types of formats used to save and record the information acquired.

Chapter five presents and describes the processing that should be applied to SEV, TER and TEM techniques. In each of them a detailed description is made, not with the mathematical detail, but with the necessary description so that users who are not very familiar with Hydrogeophysics understand what should be done and what should be obtained. A list of the software most used in Mexico is presented, and the ways in which this activity can be carried out, as well as the process, are described in a succinct manner. A space is made to describe the statistical analysis performed on the signals of the aforementioned techniques. The direct and inverse model is spoken of as a tool to decipher the structures found in the subsoil.

Chapter six shows the interpretation process where the anomalies obtained from the processing of the data are described.

Chapter seven talks about the integration of the data, where all the geographic, geological, hydrological, hydrogeological and geophysical information that allows to get a characterization of the conditions that the groundwater presents at the evaluated site converge.

Chapter eight indicates the way in which the results obtained should be expressed in a written text or in a digital file. It talks about the data, information and explicit knowledge that must be delivered. A presentation of results format is proposed.

Chapter nine presents the guidelines that should be carried out in any hydrogeophysics study, which is a synthesis of what should be done in each part of the Hydrogeophysical exploration process described in the previous chapters. It is worth mentioning that they are organized according to the Mexican NOM standard.

And finally, chapter ten presents the conclusions and areas of opportunity that arise with this work.

This work is open for improvement and for other specialists to contribute their knowledge by refining the presented guidelines, as well as expanding the other geophysical techniques that can be applied in the area of hydrogeology.

Índice

Capítulo I. Introducción

- 1.1. Motivo
- 1.2. Generalidades
- 1.3. Objetivos
- 1.4. Alcance

Capítulo II. Exploración Hidrogeofísica

- 2.1. Introducción
- 2.2. Proceso de la exploración Hidrogeofísica
- 2.3. Clasificación de los métodos geofísicos más usados en la hidrogeología
- 2.4. Alcances y limitaciones de los métodos de la Hidrogeofísica

Capítulo III. Equipos de exploración Hidrogeofísica más utilizados en México

- 3.1. Sondeo eléctrico vertical (SEV)
- 3.2. Tomografía eléctrica de resistividad (TER)
- 3.3. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM)
- 3.4. Magnetotelúrico (MT, CSAMT)
- 3.5. Gravimétrico
- 3.6. Magnético
- 3.7. Sísmico de reflexión

Capítulo IV. Adquisición

- 4.1. Procesos estocásticos
- 4.2. Proceso de adquisición
 - 4.2.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)
 - Principio físico
 - Arreglos electródicos
 - Dónde se aplica
 - Número de mediciones, apilamiento
 - Limitaciones
 - Profundidad de investigación
 - Fuentes de error
 - 4.2.2. Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER)
 - Principio físico
 - Arreglos electródicos
 - Apilamiento
 - Número de mediciones
 - Roll Alone*
 - Profundidad de investigación
 - Fuentes de error

4.2.3. Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM)

Principio físico

Arreglos de bobinas

Apilamiento

Número de mediciones

Serie de tiempo para la adquisición de datos

Ruido

Profundidad de investigación

Fuentes de error

4.2.4. Otros métodos

Magnético

Gravimétrico

Sísmicos

Polarización Inducida

Radar

Magnetotelúrico

4.3. Calibración de la información adquirida

4.4. Georreferenciación

4.5. Tipos de formatos para guardar los datos o señal adquirida

Capítulo V. Procesamiento de datos

5.1. Metodología del procesamiento

5.2. *Software* para Hidrogeofísica

5.3. Procesamiento de datos

5.3.1. Análisis estadístico

5.3.2. Modelo directo y modelo inverso

5.3.3. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

5.3.4. Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER)

5.3.5. Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM)

Capítulo VI. Interpretación

Capítulo VII. Integración

Capítulo VIII. Resultados

Capítulo IX. Propuesta de lineamientos

Capítulo X. Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Capítulo I. Introducción

1.1. Motivo

Si bien en México se realizan actividades de exploración Hidrogeofísica¹, no existe una norma o al menos un lineamiento sobre el uso y aplicación de las técnicas geofísicas en la hidrogeología. La evolución de su uso se ha basado más bien a modas y experiencias exitosas sobre su aplicación y facilidad de adquisición de datos. Sin embargo, también son muchos los fracasos que se han obtenido por una mala planeación y conceptualización del problema en la selección del método, logística de adquisición, adquisición, procesamiento, interpretación, integración y definición.

Por otra parte, algunos piensan o suponen que con el simple hecho de realizar la exploración Hidrogeofísica, se cumple con el requisito para proponer o dictaminar la perforación de un pozo. Esta situación es muy común y los resultados, la mayoría de las veces no son nada favorables, desprestigiando las bondades de la geofísica.

Sin embargo, a lo largo del tiempo se ha demostrado que la aplicación de las técnicas Hidrogeofísicas como herramienta de apoyo en la definición del modelo estático o bien, para extender el valor de una propiedad hidrodinámica, bien empleadas conlleva a una caracterización de la situación, ayuda a incrementar el éxito exploratorio y reducir la incertidumbre. (Nwankwoala, H.O. y Udom, G.J., 2008).

El presente trabajo se orienta a:

- Plantear un proceso de exploración indirecta de las aguas subterráneas, encaminado a aquellas personas que desconocen la aplicabilidad y bondades de la exploración geofísica.
- Plantear los elementos mínimos y necesarios que deben considerarse cuando se realicen trabajos de exploración Hidrogeofísica, orientados específicamente para aquellas personas que demandan los servicios de Hidrogeofísica, responsables de los proyectos de factibilidad hidrogeológica, caracterización de zonas contaminadas, cuantificación de acuíferos, determinación de parámetros y propiedades hidrodinámicas, así como la toma de decisiones, entre otras.
- Proponer los Lineamientos, como inicio para los ingenieros geofísicos, que sean la base para normar las actividades relacionadas con la exploración geofísica en la hidrogeología.

¹ Se entiende por Hidrogeofísica al uso y desarrollo de técnicas y metodologías geofísicas orientadas a la exploración y evaluación de las propiedades de las rocas y estructuras geológicas que están relacionadas con los procesos hidrogeológicos.

1.2. Generalidades

La mayoría de las grandes ciudades o comunidades rurales de México se ubican en elevaciones topográficas superiores a los 1 400 metros sobre el nivel del mar. Esta situación origina que la disponibilidad del recurso sea a través del agua subterránea, lo cual requiere de la perforación de pozos a diferentes profundidades, en sitios con ambientes geológicos complejos. Lo anterior, hace necesario investigar y proporcionar los elementos técnicos suficientes que permitan una caracterización eficiente para una oportuna toma de decisiones en cuanto a perforar o no un pozo, identificar la calidad del agua subterránea y conocer la distribución de la contaminación en el subsuelo; para el caso de zonas costeras, a definir el avance de la intrusión marina. Otras aplicaciones donde la Hidrogeofísica puede apoyar se orientan a la detección de acuitardos, conexión entre acuíferos, carsticidad, a la identificación de contactos de material compacto con material granular, identificación de estructuras geológicas con potencial hidráulico, estudios de acuíferos en geotermia, delimitación en planta de alguna propiedad hidrogeológica con base en la respuesta Hidrogeofísica y riesgo geológico, entre otras. (Vereecken, H, et al, 2004).

Lo anterior implica la necesidad de realizar estudios hidrogeológicos a detalle para conceptualizar, caracterizar y definir con mayor grado de certidumbre, la factibilidad de encontrar agua a mayor profundidad, que permita sustentar la vida de las ciudades o comunidades que la requieren, identificar y prevenir riesgos hidrogeológicos (desabasto de agua, hundimiento diferencial del terreno, socavones, desplazamiento de masa, energía calorífica, contaminación, sequía, cambio climático, entre otros).

El conocimiento del modelo estático del medio, donde se acumula el agua (natural o contaminada) en el subsuelo, es esencial para definir la geometría y las variaciones laterales y horizontales que presenta el medio hidrogeológico a través de la Hidrogeofísica. Si bien, la geología o hidrogeología se basan en “lo que se ve”, la Hidrogeofísica se enfoca lo que “no se ve” y tiene las siguientes bondades:

- No es destructiva (no afecta al sistema hidrogeológico, no es invasivo).
- Obtiene un mayor volumen de datos puntuales o continuos, distribuidos en superficie (mayor área de investigación). El tipo de dato depende del método a emplear.
- Es más económica con respecto a un pozo o una perforación (define los sitios dónde realizar la investigación directa, sólo para calibrar).
- Apoya en la definición de la geometría del subsuelo.
- Llena vacíos que no puede proporcionar la exploración directa.
- Da idea de la distribución de una propiedad hidrodinámica o de transporte para construir modelos matemáticos.
- Reduce la incertidumbre del riesgo geológico o hidrogeológico (se tiene mejor certeza).
- Es un elemento de ayuda para la toma de decisiones.

Por otra parte, también es necesario conocer el nivel de caracterización que se desea, el cual depende del nivel de heterogeneidad, objetivo, escalas y normas ambientales aplicables. Rubin Y. y Hubbard S. (2005) proponen una gráfica, **Figura 1.1**, en la que se relaciona la escala de investigación versus la resolución relativa deseada del tipo de exploración a realizar. Esta gráfica es importante ya que a partir de ella se puede plantear el tipo de investigación indirecta a realizar.

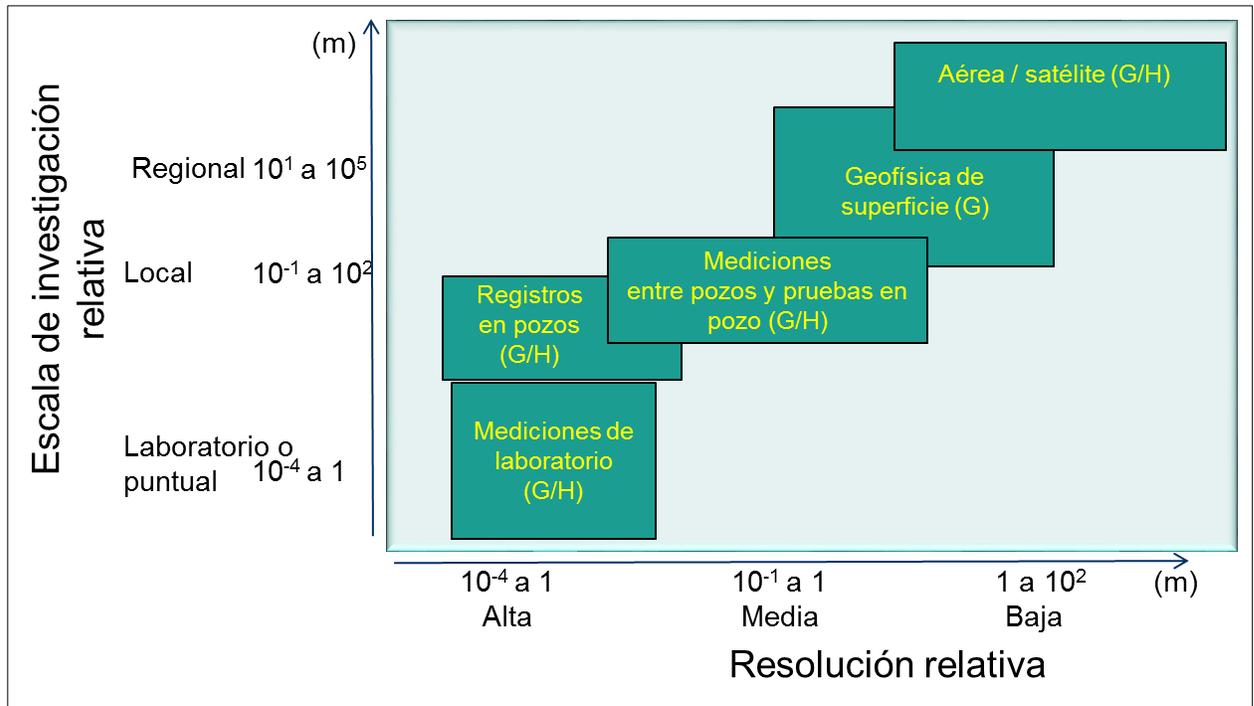


Figura 1.1. Nivel de caracterización de los estudios geofísicos (Tomado de Rubin Y. y Hubbard S., 2005)

1.3. Objetivos

El trabajo realizado plantea:

- Establecer los criterios con base en los cuales los usuarios de los servicios de la exploración Hidrogeofísica, tengan los elementos para contratar los servicios y conocer los resultados que pueden obtener.
- Establecer los criterios con los cuales los exploradores geofísicos tengan los elementos para obtener los resultados deseados.
- Proponer el proceso de investigación que debe aplicarse en el uso y manejo de los métodos geofísicos.
- Presentar los métodos geofísicos más empleados en la hidrogeología en México.
- Reducir costos de exploración directa.

1.4. Alcance

Al contar con un proceso avalado, se plantearán mejores proyectos, se reducirá la incertidumbre en cuanto a los resultados a obtener y se homologarán los criterios de la exploración Hidrogeofísica.

Capítulo II. Exploración Hidrogeofísica

2.1. Introducción

Con base en la definición propuesta en el capítulo anterior, la Hidrogeofísica provee información indirecta basada en la medición de los campos naturales de la Tierra (N) o inducidos (I), para conocer la distribución de una propiedad física, específicamente la relacionada con la porosidad y permeabilidad. En la **Tabla 2.1** se muestra la clasificación de las propiedades físicas de las rocas, el tipo de medición que se hace y el tipo de método geofísico que la obtiene.

Tabla 2.1. Clasificación de los métodos geofísicos (E. Mussett y M.A. Kahan, 2000)

Propiedad física	Campo natural (N) o inducido (I)	Método geofísico
Densidad	Gravedad (N)	Gravimétrico
Susceptibilidad magnética	Geomagnético (N)	Magnético
Resistividad	Eléctrico (N, I)	Eléctrico
Resistividad	Electromagnético (N,I)	Electromagnético
Velocidad	Propagación sísmica (I)	Sísmico
Temperatura	Térmico (N)	Geotérmico
Radiactividad	Radiactivo (N)	Radiométrico

En la tabla se observa que no aparece el término porosidad. El valor se estima en función de la capacidad del medio para contener agua y la respuesta esperada, son contrastes de una disminución en los valores de densidad, un incremento en los valores de conductividad eléctrica, una disminución en los valores de velocidad de la onda P en el medio poroso o fracturado, así como un incremento o decremento en los valores de temperatura o radiactividad, entre otros.

2.2. Alcances y limitaciones de los métodos de la Hidrogeofísica

A veces, se piensa que la aplicación de algún método geofísico va a dar la solución deseada; sin embargo, al realizar la medición se obtienen resultados no esperados, creando confusión y descrédito a la disciplina.

La aplicación de los métodos geofísicos, como ya se mencionó, depende de una parte del nivel de detalle y, además se debe considerar que:

- Existen diferentes herramientas y métodos.
- Cada técnica tiene sus limitaciones.
- La técnica por aplicar proporcione un contraste de valores que apoye a definir el objetivo del estudio.
- La densidad de mediciones a realizar esté acorde a las dimensiones del objetivo.

El éxito de la aplicación de la exploración Hidrogeofísica está en la integración de sus datos con diferentes informaciones geocientíficas del área estudiada, tanto en la fase de diseño como en la de interpretación.

Para la selección del método a elegir, siempre es necesario plantearse cinco preguntas (Mussett, A.E.; Khan, M.A., 2000):

1. ¿El problema a resolver tiene una expresión Hidrogeofísica?

Las mediciones de Hidrogeofísica responden a variaciones de propiedades físicas de las rocas o del medio, no a las condiciones geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas o ambientales.

Para la situación de este trabajo, la evaluación de la zona saturada y drenada es una de las incógnitas a considerar. Se desea conocer la variación de alguna propiedad física de la roca que mida su condición cuando está o no saturada (porosidad). Otro problema por resolver es la de apoyar en la definición de la columna estratigráfica presente en el área relacionada con la permeabilidad que puedan presentar las rocas. Esto dependerá de la profundidad de investigación que se plantee en la adquisición de los datos.

También es necesario conocer la geometría del cuerpo almacenador de agua.

2. ¿La variación de lo que se va a medir es lateral o vertical?

Otra situación por resolver es la continuidad lateral y vertical de las propiedades físicas del medio, las cuales serán correlacionadas con las unidades litológicas para identificar la columna estratigráfica presente en el área. En esta situación, es importante definir qué tipo de variación se quiere identificar en el subsuelo, si es vertical (asociada a capas paralelas a la superficie del terreno), lateral o ambas.

Para el caso de variaciones verticales hay que tener en mente que algunos métodos proporcionan información puntual, lo que implica que la incertidumbre lateral es mayor a medida que la separación entre las mediciones aumenta. Existen métodos que reducen esta incertidumbre al obtener mediciones más cortas; sin embargo, el costo económico es mayor. La definición de las variaciones laterales dependerá del grado de exactitud que requiera el cliente.

3. ¿La señal es detectable?

A veces a pesar de haber cumplido con las primeras dos consideraciones, la fuente natural o inducida no es lo suficientemente fuerte para ser identificada por el instrumento. Esto se puede deber a que el objetivo es muy profundo, presenta un espesor delgado o bien, el cuerpo de interés es muy pequeño. Lo anterior implica contar con el equipo de medición adecuado a las condiciones que se pretende investigar (específicamente en los métodos inducidos), así como definir la densidad y la separación de los puntos de medición.

A medida que el objetivo es más pequeño o delgado se requiere reducir la separación de las mediciones. Por otra parte, a medida que el objetivo es más profundo se obtienen mediciones con valores promedio que responden a los cuerpos que integran el subsuelo y una señal más ruidosa.

4. ¿El resultado será de utilidad?

Todos los métodos geofísicos sufren algún grado de ambigüedad en la interpretación, lo que limita lo que se pueda esperar de la medición.

Algunas veces esta ambigüedad es intrínseca a la técnica, como la no singularidad (donde una gran cantidad de cuerpos presentes en el subsuelo, con diferentes valores podrían estar produciendo la misma anomalía observada). Aquí se puntualiza que las interfases hidrogeofísicas identificadas no necesariamente son límites geológicos. La ambigüedad también se deriva de la resolución limitada del método utilizado y por errores en las lecturas de medición.

5. ¿La ejecución del estudio es factible?

La factibilidad de la ejecución de un proyecto geofísico depende de:

- Objetivo y alcance que se pretende.
- Presupuesto.
- Condiciones físicas (topográficas, climáticas, vegetación y mancha urbana).
- Dimensiones del área a evaluar.
- Capacidad del equipo de medición.
- Existencia de un contraste importante en las propiedades físicas en el medio que se mide.

Para realizar cualquier tipo de estudio geofísico se recomienda iniciar con una evaluación geológica-geofísica regional, realizar una medición en un sitio donde se tenga información del subsuelo para calibrar los datos y con base en los resultados, incrementar el número de mediciones y técnicas de adquisición para reducir la incertidumbre.

Hay que recalcar que el estudio de Hidrogeofísica no es único, se deben incorporar e integrar diferentes disciplinas del conocimiento para llegar a la solución.

2.3. Proceso de la exploración Hidrogeofísica

La exploración Hidrogeofísica aplica el método científico el cual se plasma en el siguiente proceso, **Figura 2.1**. La primera fase de este proceso es la de **conceptualizar** (información disponible) las condiciones físicas que se presentan en la zona como es la topografía, vías de comunicación, accesos, dimensiones del área a evaluar y condiciones geológicas e hidrogeológicas históricas. Con base en la información disponible o conocimiento del área a evaluar se podrá identificar la necesidad del cliente, orientar el problema a resolver, proponer la logística de adquisición de los datos y su obtención. Lo anterior involucra plantear una propuesta para actualizar la información a través de conseguir información precisa de datos que estén contextualizados, categorizados, calculados, corregidos y condensados, para que proporcionen la información que se desea. (Valhondo, D., 2003).

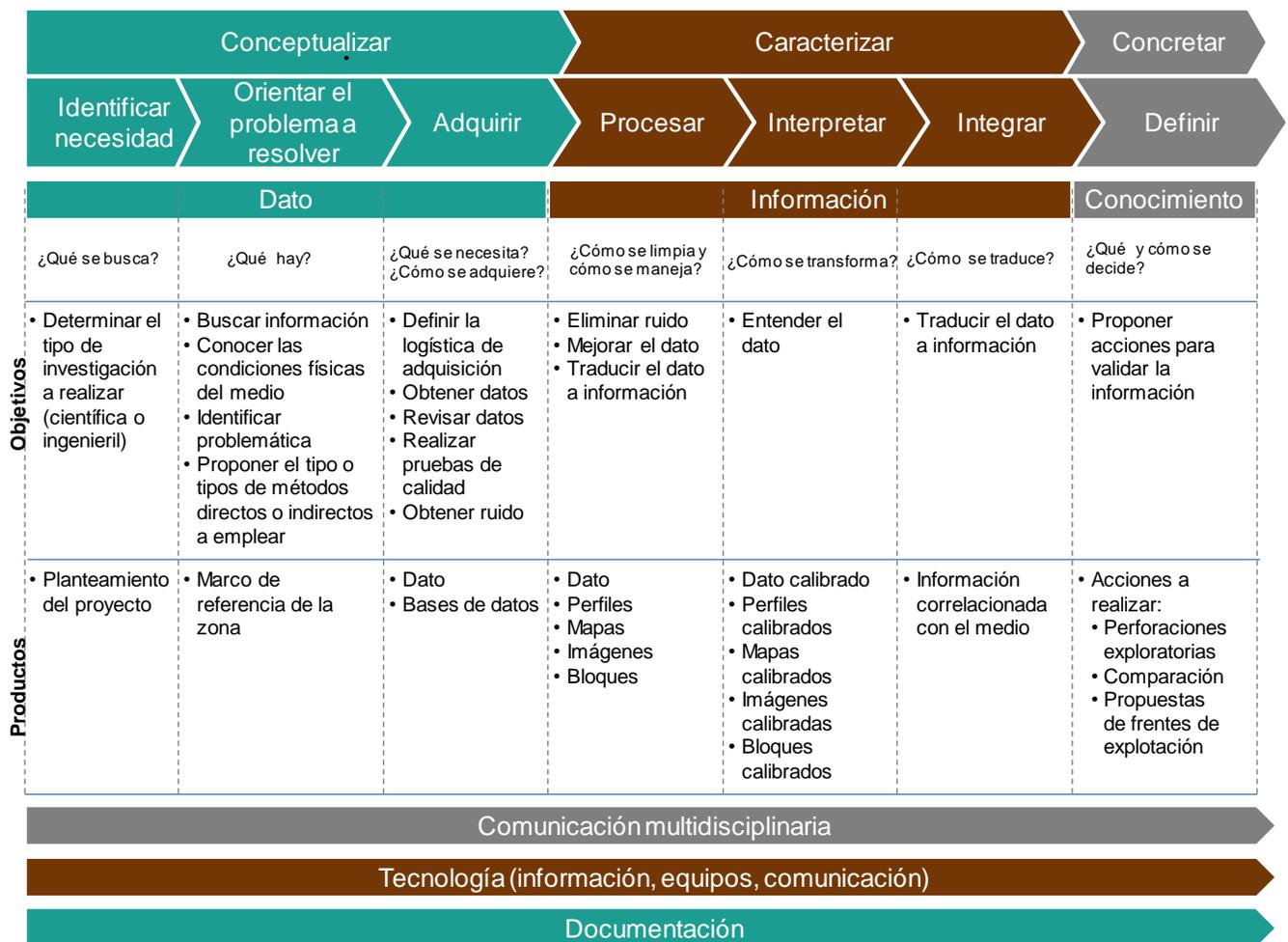


Figura 2.1. Proceso de exploración Hidrogeofísica (EXEVHI, 2015)

Con base en la información obtenida, la segunda fase del proceso se refiere a **caracterizar** (actualizar la información) las condiciones que presenta el sitio a evaluar; involucra el procesamiento de los datos, interpretarlos e integrarlos, lo cual permitirá comparar la información con otros resultados o de otras áreas, ver qué consecuencias tiene la información para la toma de decisiones, ver las conexiones que existen con otras áreas del conocimiento y conversar con otros especialistas para ver qué opinión tienen acerca del conocimiento que se ha adquirido, buscar referencias con el objeto de dar o proponer el resultado de la investigación, (Valhondo, D., 2003).

La tercera fase, **concretar** (definir) qué es lo que se obtuvo a través de un dictamen para proponer los sitios donde realizar la exploración directa; o bien, plantear alternativas para el abastecimiento de agua, sitios contaminados, zonas favorables para infiltrar agua, calidad de agua, intrusión marina, extensión de alguna propiedad hidrogeológica con base en la respuesta física del subsuelo, entre otras.

Para cada una de las fases se requiere de personal calificado con las competencias suficientes y necesarias para llevar a cabo el trabajo, equipo de medición de acuerdo con el tipo de exploración a efectuar, dimensiones laterales y la profundidad que se desea investigar, así como el *software* específico para realizar el procesamiento de los datos.

Todo lo anterior involucra una fuerte inversión económica en los equipos de adquisición y procesamiento, así como en el *software* para cada tipo de método a emplear. Es necesario también, calcular el tiempo que se invertirá para realizar las actividades de logística de adquisición, diseño de adquisición, adquisición, procesamiento, interpretación, integración y definición.

2.4. Clasificación de los métodos geofísicos más usados en la hidrogeología

Para la clasificación del método geofísico a emplear es necesario considerar:

1. Conocer el sitio donde se realizará la medición Hidrogeofísica.
2. Evaluar previamente sobre el tipo o tipos de estudios geofísicos a ejecutar, con base en las condiciones geográficas, geológicas e hidrogeológicas.
3. Trabajar en equipo con un hidrogeólogo para definir qué es lo que se busca para calibrar la información:
 - Es indispensable la comunicación para entender qué es lo que el hidrogeólogo requiere.
 - Estar de acuerdo en el nivel de incertidumbre de los resultados.
4. Entender el marco físico de referencia, objetivo y alcance del proyecto (considerando la escala de investigación); así como tener una idea del presupuesto que se tiene asignado para el proyecto.

En la **Tabla 2.2** se presentan los diferentes métodos que se pueden aplicar con base en la escala de investigación propuesta en la Figura 1.1.

La selección del método a utilizar requiere de conocimiento, habilidad y experiencia. (Binley, et al, 2010; Nwankwoala, H.O. y Udom, G.J., 2008; Casas A.2002).

Tabla 2.2. Tipo de método con base en la escala y sus aplicaciones (1/4)

A nivel regional

Tipo de método	Método/Técnica/ Propiedad	Aplicación	Profundidad de investigación
Aéreo	Percepción remota (imágenes de satélite/ reflectancia)	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad de suelo, áreas de riego • Estimación de vegetación • Estimación del volumen de extracción de pozos • Identificación de litologías 	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie
	Magnetometría (unidades magnéticas/ susceptibilidad magnética)	<ul style="list-style-type: none"> • Basamento • Estructuras geológicas • Identificación de estructuras con mayor aporte de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Basamento volcánico - sedimentario
	Gravimetría (densidad)	<ul style="list-style-type: none"> • Geometría a nivel regional • Estructuras geológicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Basamento volcánico sedimentario
	Radiométrico (Espectrometría/ espectro de radiactividad)	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo litológico • Salinidad de agua • Descarga de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie
	Electromagnético (Electromagnético en el dominio del tiempo/ conductividad/resistividad)	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo litológico • Salinidad de agua • Descarga de agua • Resistividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende del tamaño de la bobina, la intensidad de corriente y frecuencia de 100 a 1 000 m
	Electromagnético (Electromagnético en el dominio de la frecuencia/conductividad)	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo de conductividad • Salinidad de suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiendo de la frecuencia y capacidad del equipo (hasta 2 000 m)

Tabla 2.2. Tipo de método con base en la escala y sus aplicaciones (2/4)

A nivel local

Tipo de método	Método/Técnica/ Propiedad	Aplicación	Profundidad de investigación
Terrestre	Radiométrico (Espectrometría/radiactividad U, Th, K)	<ul style="list-style-type: none"> Contaminación 	<ul style="list-style-type: none"> Superficie
	Eléctrico (Polarización inducida/ cargabilidad) en tiempo y espectral	<ul style="list-style-type: none"> Contaminación 	<ul style="list-style-type: none"> Depende de la capacidad del equipo, como tomografía (50 m)
	Sísmico (Sísmica de refracción (TRS)/Velocidad ondas P y S)	<ul style="list-style-type: none"> Mapeo de cima de rocas compactas Identificación de fallas geológicas Módulos elásticos 	<ul style="list-style-type: none"> Depende de la fuente de energía (hasta 100 m)
	Sísmico (Sísmica de reflexión/ velocidad onda P)	<ul style="list-style-type: none"> Mapeo estratigráfico Identificación de la cima de roca compacta Zonas con fallas y fracturas 	<ul style="list-style-type: none"> Depende del arreglo (distancia entre geófonos) y fuente (hasta 5 000 m)
	Electromagnético (Radar (GPR)/ Constante dieléctrica)	<ul style="list-style-type: none"> Mapeo estratigráfico Nivel del agua 	<ul style="list-style-type: none"> Depende de la frecuencia de la antena y del tipo de material que se encuentra en el subsuelo, (hasta 20 m)
	Resonancia magnética	<ul style="list-style-type: none"> Contenido de agua 	<ul style="list-style-type: none"> Depende de la capacidad del equipo (hasta 100 m)

Tabla 2.2. Tipo de método con base en la escala y sus aplicaciones (3/4)

A nivel local

Tipo de método	Método/Técnica/ Propiedad	Aplicación	Profundidad de investigación
Terrestre	<p>Eléctrico (Resistividad eléctrica SEV, calicatas, tomografía 2, 3 y 4D/Resistividad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades electroestratigráficas • Movimiento de fluidos • Plumas de contaminación • Intrusión salina • Estimación de conductividad hidráulica • Localización de fuentes de abastecimiento de agua • Nivel del agua • Basamento hidráulico • Estimación de anisotropías hidráulicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende del arreglo, técnica y capacidad del equipo y separación máxima de electrodos: <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> SEV (de 10 a 500 m) <input type="checkbox"/> Imagen eléctrica (de 2 a 50 m); con equipo multielectrónico
	<p>Electromagnético (Electromagnético en el dominio del tiempo (TEM) /conductividad/resistividad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades electroestratigráficas • Intrusión salina • Contaminación • Geometría del acuífero 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende del tamaño de la bobina, corriente de inyección y ventana de captura del equipo (de 50 a 800 m)
	<p>Electromagnético (Electromagnético en el dominio de la frecuencia (FEM)/ (fase – cuadratura, - conductividad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad eléctrica • Calidad del agua • Zonas contaminadas • Intrusión salina 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la frecuencia y de la resistividad de la primera capa (de cm a 20 m)

Tabla 2.2. Tipo de método con base en la escala y sus aplicaciones (4/4)

A nivel local

Tipo de método	Método/Técnica/ Propiedad	Aplicación	Profundidad de investigación
Terrestre	Magnetoteléurico (MT)	<ul style="list-style-type: none"> • Características estructurales • Estratigrafía 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende de la frecuencia, para fines hidrogeológicos de hasta 2 000 m

A nivel detalle

Tipo de método	Método/Técnica/ Propiedad	Aplicación	Profundidad de investigación
Pozo	Registros geofísicos de pozos (todas las propiedades de los métodos de superficie)	<ul style="list-style-type: none"> • Estratigrafía • Definición de capas permeables • Estimación de conductividad hidráulica • Calidad de agua • Contenido de agua • Fracturas • Zonas de aporte • Estimación de litología • Porosidad 	<ul style="list-style-type: none"> • En registro eléctrico (de cm a 5 m) • En registros radiactivos (5 a 10 cm) • En registros acústicos (5 a 10 cm)
	Sísmico (<i>Cross Hole</i> /onda P y S)	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación de litología • Fracturas 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiendo de la profundidad del agujero y la fuente de energía (hasta 20 m entre pozos)

Capítulo III. Equipos de exploración Hidrogeofísica más utilizados en México

A continuación, se presentan los equipos más usados en México por método y técnica, no son restrictivos y existe una gran variedad.

3.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Tabla 3.1. Equipos más usados en la obtención de SEV

Fabricante	Equipo	Propiedad que mide	Profundidad de investigación
Scintrex	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor IPC7/2.5 o 3 Kw • Receptor IPR8, IPR10 ó IPR12 • Transmisor GGT-3/ZMG-3 de 3 KW 	Resistividad Cargabilidad (PI)	Hasta 500 m
Iris Instruments	<ul style="list-style-type: none"> • Syscal Jr • Syscal R2 • Syscal PRO (multicanal 10) 	Resistividad Resistividad-cargabilidad Resistividad-cargabilidad	Hasta 200 m Hasta 200 m Hasta 200 m
Instrumentation GDD Inc	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor de corriente GDD TX-II 5000W-2400V, • Receptor de 24 canales GDD modelo GRX-24 	Resistividad-cargabilidad	Hasta 700 m
Geoelec, s.a. de c.v.	<ul style="list-style-type: none"> • Transmisor de corriente y receptor 	Resistividad	Hasta 200 m
ABEM Instrument AB	<ul style="list-style-type: none"> • Terrameter LS (2.5 Amperes) 	Resistividad-cargabilidad	Hasta 500 m
AGI Advanced geosciences, Inc	<ul style="list-style-type: none"> • SuperSting R1 IP 	Resistividad	Hasta 200 m
GF Instruments s.r.o	<ul style="list-style-type: none"> • ARES – Automatic Resistivity system 	Resistividad-cargabilidad	Hasta 500 m

3.2. Tomografía eléctrica de resistividad

Tabla 3.2. Equipos más usados en la obtención de TER

Fabricante	Equipo	Propiedad que mide	Profundidad de investigación
Scintrex	• SARIS Resistivity System	Resistividad	Hasta 30 m
Iris Instruments	• Syscal PRO (multicanal 10)	Resistividad-cargabilidad	Hasta 50 m
ABEM Instrument AB	• Terrameter LS (2.5 Amperes)	Resistividad-cargabilidad	Hasta 200 m
GF Instruments s.r.o.	• ARES - automatic resistivity system	Resistividad-cargabilidad	Hasta 50 m
AGI Advanced geosciences, Inc	• SuperSting R8 IP	Resistividad - cargabilidad	Hasta 50 m
Geomative	• SuperSting R8 IP	Resistividad - cargabilidad	Hasta 50 m

3.3. Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM)

Tabla 3.3. Equipos más usados en la obtención de TEM

Fabricante	Equipo	Propiedad que mide	Profundidad de investigación
Geo Instruments Pty Limited	• Sirotem MK3 (7Amperes)	Conductividad - resistividad	Hasta 500 m
Monash GeoScope	• Terratem (10 o más Amperes)	Conductividad - resistividad	Hasta 1,000 m
Geometrics	• Stratagem	Conductividad - resistividad	Hasta 450 m
ABEM Instrument AB	• WalkTem (15 Amperes)	Conductividad - resistividad	Hasta 500 m con antena RC-200
Applied Electromagnetic Research (AEMR).	• Tem Fast 48	Conductividad - resistividad	Hasta 200 m
WTS Geophysical	• WTEM 2Q	Conductividad - resistividad	Hasta 1,000 m

3.4. MT y AMT

Tabla 3.4. Equipos más usados en la obtención de MT

Fabricante	Equipo	Propiedad que mide	Profundidad de investigación
Terraplus	GDP-32245	Conductividad	hasta 2 000 m
	Geode EM3D AMT o HSAMT (Stratagem EH4)	Conductividad	hasta 2 000 m
Geometrics	KMS-820	Conductividad	hasta 2 000 m
KMS Technologies	ADU-07e	Conductividad	hasta 2 000 m
Metronix Geophysics			

3.5. Gravimetría

Tabla 3.5. Equipos más usados en la obtención de datos gravimétricos

Fabricante	Equipo	Propiedad que mide	Profundidad de investigación
Scintrex	CG-5 o GC-6	Aceleración de la gravedad	cm a 10 000 m
LaCoste&Romberg	G o D	Aceleración de la gravedad	m a 10 000 m
ZLS Corporation	Burriss gravity Meter	Aceleración de la gravedad	m a 10 000 m

3.6. Magnético

Tabla 3.6. Equipos más usados en la obtención de datos magnéticos

Fabricante	Equipo	Propiedad que mide	Profundidad de investigación
Scintrex	CS-3	campo magnético total	cm a 10 000 m
Geometrics	G-856AX o G857	campo magnético total	cm a 10 000 m

3.7. Sísmico de reflexión

Se aplica en la exploración de acuíferos profundos. Los equipos de adquisición son los mismos que se usan en la industria petrolera. Se debe tener cuidado en formaciones volcánicas, la frecuencia de generación de la onda de reflexión debe diseñarse con base en los posibles eventos volcánicos presentes (derrames, tobas, lahares, etc.).

Capítulo IV. Adquisición

Una parte importante en la mayoría de los datos adquiridos en la Hidrogeología es el tipo de señal, la cual en general se obtiene en ventanas donde se apila y adquiere una gran cantidad de datos (algunas más y algunas menos), lo anterior implica que las señales se pueden tratar como un medio estocástico. La Hidrogeofísica no es la excepción, específicamente para los métodos eléctrico, electromagnético y magnetotelérfico.

4.1. Procesos estocásticos

Los procesos estocásticos se refieren al comportamiento de modelos o sistemas a través del tiempo, sufriendo variaciones debidas al azar, la palabra estocástico es sinónimo de aleatorio. Este tipo de procesos sirve para entender y comprender la correlación, que es la relación entre varios datos.

Un proceso estocástico es una colección o familia de variables aleatorias $\{X_t$, con $t \in T\}$, ordenadas según el subíndice t que en general se suele identificar con el tiempo. Por tanto, para cada instante t tendremos una variable aleatoria distinta representada por X_t , con lo que un proceso estocástico puede interpretarse como una sucesión de variables aleatorias cuyas características pueden variar a lo largo del tiempo. (Ruiz, M.C., 2015). Por ejemplo, si se observan algunos valores de t , gráficamente se pueden representar como en la **Figura 4.1**.

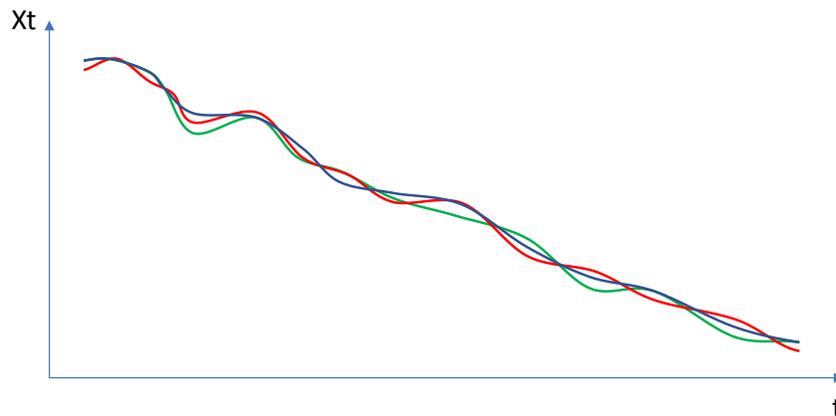


Figura 4.1. Ejemplo de una señal que se obtiene en diferentes momentos (por ejemplo, TEM)

En esta figura se representa para cada intervalo de tiempo en que se adquiere una señal, puntualmente en cada instante se obtiene un valor parecido, pero no igual. A los posibles valores que puede tomar la variable aleatoria se les denomina estados, por lo que se puede tener un espacio de estados discretos y un espacio de estados continuo. En cuanto a la variable de tiempo puede ser de tipo discreta o continua. En el caso discreto se puede tomar como ejemplo los cambios que se presenta en la señal de TEM, cuando se toman varias mediciones en una adquisición de datos (tomando en cuenta que todas las mediciones se

realizan con los mismos parámetros de adquisición, ventana, ganancia, apilamiento). Lo anterior se explica que en cada medición de TEM, TER o SEV, al obtener una medición se obtiene una gráfica temporal; si se realizan varias mediciones, se obtienen tantas gráficas como mediciones realizadas.

Con base en lo anterior, dependiendo de cómo sea el conjunto de subíndices T y el tipo de variable aleatoria dada por X, se puede establecer la siguiente clasificación de procesos estocásticos (Ruiz, M.C., 2015). **Tabla 4.1**

Tabla 4.1. Clasificación de los procesos estocásticos

TIEMPO \ ESTADOS	Series discretas numerables	Procesos continuos
Discretos Numerables	Serie estocástica con espacios de estados discretos	Proceso estocásticos con espacios de estados discreto
Continuos	Serie estocástica con espacios de estados continuo	Proceso estocásticos con espacios de estados continuo

Por tanto, una realización de un proceso estocástico es una sucesión de infinitos valores de una cierta variable a lo largo del tiempo. Si t tiene una consideración continua, se obtendrá una representación continua; mientras que, si t es discreto se obtendrá una sucesión de puntos.

Con base en la definición "una serie temporal será una sucesión de valores de una variable obtenidos de manera secuencial durante el tiempo", la única diferencia que hay entre ellas radica en que la realización consta de infinitos elementos y la serie temporal de un número limitado. Esto implica que a la señal aleatoria se le puede calcular su media, varianza, desviación estándar y otras características estadísticas.

4.2. Proceso de adquisición

Para los fines del presente trabajo se consideran para la exploración Hidrogeofísica los métodos eléctricos (SEV y TER)² y electromagnético (TEM)³, al ser los que están más relacionados con la porosidad del medio y los más económicos en cuanto al costo; son los más usados en México.

Otros métodos como el MT⁴, CSAMT⁵, gravimetría, magnetometría y sísmica de reflexión se utilizan para definir estructuras profundas, o bien georadar GPR⁶, polarización inducida,

² SEV: Sondeo eléctrico vertical; TER (Tomografía eléctrica de resistividad).

³ TEM (Sondeo electromagnético en el dominio del tiempo).

⁴ MT (Magnetotelúrico)

⁵ CSAMT (Magnetotelúrico de fuente controlada)

⁶ GPR (Radar de penetración terrestre)

electromagnético en el dominio de la frecuencia para estructuras someras, o bien resonancia magnética que permite identificar porosidad. Para el caso de este trabajo no se tratan y se deja un área de oportunidad para ampliarlo.

El proceso de adquisición de los datos se plantea en la **Figura 4.2**.

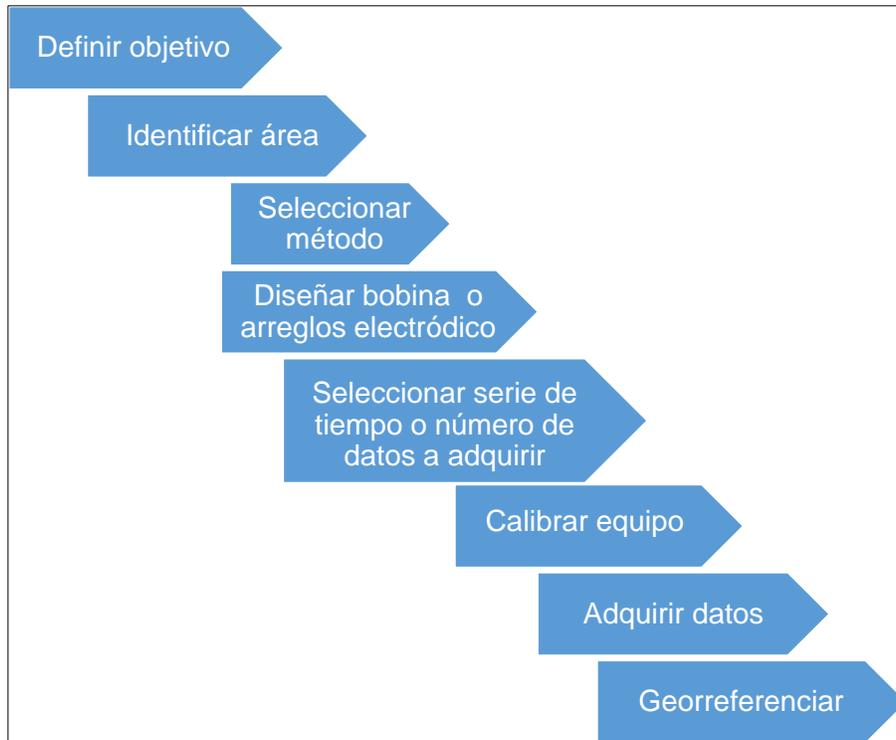


Figura 4.2. Proceso de adquisición de datos en la exploración Hidrogeofísica

Para proponer la manera de adquirir los datos con base en los objetivos que se planteen, es necesario tomar en consideración los aspectos teóricos de los métodos a utilizar.

En las investigaciones de resistividad, las propiedades eléctricas de los materiales que integran las rocas se establecen a partir de la medición de la resistencia al flujo de una corriente eléctrica, la cual se realiza por medio de electrones libres en metales o bien, a través de los poros de las rocas que contengan un fluido conductor. En general, las rocas presentan una alta resistividad; sin embargo, algunos minerales como las arcillas y de origen férrico, provocan que la conductividad eléctrica se incremente. Cuando la roca presenta porosidad con 100% de saturación de agua, la resistencia también disminuye y la resistividad de la roca se puede asociar también a la porosidad y al fluido que la contiene de acuerdo a la fórmula que propuso Archie (1942) y que ha sido válida para muchos estudios relacionados con la saturación de agua en yacimientos de hidrocarburos de tipo granular; así como también, el término denominado como Factor de Formación que no es más que otra relación en donde el factor eléctrico está relacionado (Pérez-Rosales C. 1982). Si bien estos conceptos no han sido aplicados, con detalle, en la exploración hidrogeológica en México, son un elemento de apoyo para correlacionar formaciones resistivas con las propiedades de los acuíferos en formaciones de tipo granular, (Mishra, P.K, Kuhlman, K.L., 2013).

4.2.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Principio físico

Es un método eléctrico de investigación puntual que determina de manera vertical las resistividades por debajo del punto fijo del sondeo. Consiste en inyectar corriente a partir de dos electrodos de corriente y detectar el voltaje en otros dos electrodos, de acuerdo con la colocación que tengan los cuatro electrodos en la superficie del terreno, variando en cada medición las longitudes entre electrodos. Al incrementar la distancia entre los electrodos de corriente la profundidad de investigación va a ser mayor, obteniendo así resistividades aparentes a diferentes profundidades. Dependiendo de la distancia entre los electrodos de potencial y el tipo de arreglo, se utilizará un factor geométrico correspondiente. **Figura 4.3**

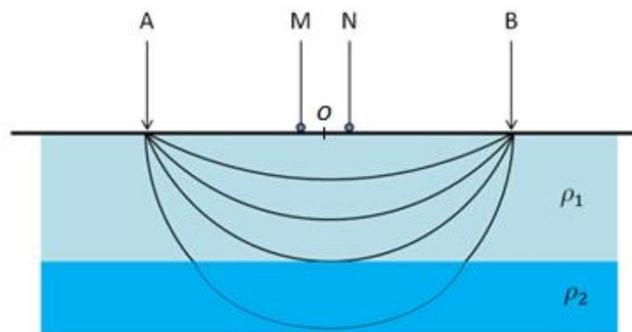


Figura 4.3. Principio del método eléctrico. A medida que A y B se separan, la corriente penetrará en las capas más profundas

Se considera que el medio se compone de estratos horizontales, así las variaciones serán solamente en sentido vertical, las cuales generalmente se representan en una gráfica log-log, ubicando los valores de resistividad aparente contra la distancia media entre los electrodos de corriente. El modelo ideal para realizar SEV es aquel que se compone de dos o más capas horizontales o estratos lateralmente homogéneos. (Orellana, 1982).

Si la distancia entre los electrodos de corriente aumenta, la corriente va a circular a mayor profundidad, pero su densidad va a disminuir. En un medio isótropo y homogéneo el 50% de la corriente va a circular por encima de la profundidad $AB/2$ y casi el 71% por encima de la profundidad AB . (Orellana, 1982).

El método consiste en elegir un centro de sondeo, el cual será el punto de investigación; a partir de éste, se colocarán los electrodos a una distancia determinada dependiendo del tipo de arreglo. Una vez realizada la medición se procede a mover los electrodos aumentando la distancia entre los mismos, también dependiendo del tipo de arreglo, como se presenta a continuación.

Arreglos electródicos

Los arreglos más comunes para realizar SEV son: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo.

- *Wenner*

En este arreglo los electrodos de potencial (M, N) se mantienen en el centro del arreglo, mientras los electrodos de corriente (A, B) se encuentran en los extremos. La distancia entre electrodos es a y es la misma para cada electrodo. **Figura 4.4.**

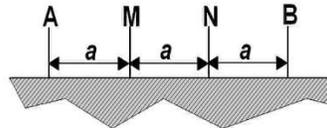


Figura 4.4. Arreglo electródico Wenner

Factor geométrico $K = 2\pi a$

- *Schlumberger*

El arreglo Schlumberger, considera mantener la separación entre los electrodos de potencial lo más corta posible, mientras que la separación $A M$ y $N B$ aumenta. El número de separaciones de los electrodos de corriente depende del detalle que se quiera del subsuelo; sin embargo, antiguamente, cuando los equipos de cómputo presentaban limitaciones, el número de mediciones entre décadas (los datos se presentaban en escala logarítmica) eran del orden de siete a diez mediciones. **Figura 4.5.**

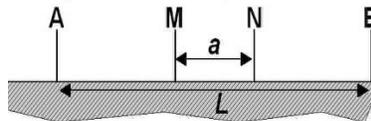


Figura 4.5. Arreglo electródico Schlumberger

Factor geométrico $K = \pi n(n+1)a$

- *Wenner -Schlumberger*

Los electrodos de corriente $A B$ se alejan una distancia L y los de potencial $M N$ se quedan fijos una distancia a . Es sensitivo tanto a estructuras verticales como a horizontales; es útil en donde se esperan cuerpos con extensión en ambas direcciones. La profundidad de investigación aproximada en este arreglo es la quinta parte de la longitud total del arreglo.

Factor geométrico $K = \pi n(n + 1)a$

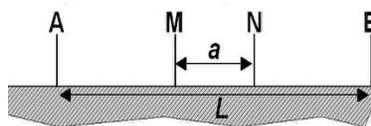


Figura 4.6. Arreglo Wenner-Schlumberger

- *Dipolo – Dipolo*

En este arreglo los electrodos de corriente van a estar juntos, igual que los electrodos de potencial. AB y MN van a variar una distancia a mientras que BM varían na . Este arreglo es el que se aplica principalmente en mediciones de Polarización Inducida. **Figura 4.6.**

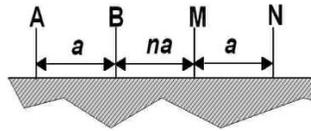


Figura 4.7. Arreglo electrodico Dipolo-Dipolo

Factor geométrico $K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$

- *Otros arreglos electrodicos*

En la **Figura 4.8** se presenta en forma esquemático otro tipo de arreglos electrodicos que se pueden emplear.

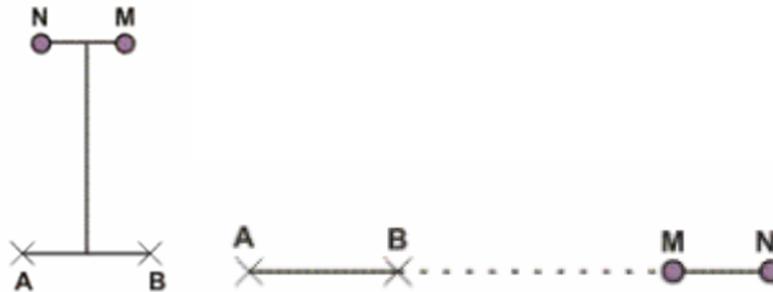


Figura 4.8. Arreglos electrodicos radial y axial

Dónde se aplica

- En terrenos con topografía suave, de poca pendiente (si la topografía es abrupta hay que aplicar corrección y los puntos de atribución se ubican perpendiculares a la topografía).
- En donde se estima que el subsuelo es estratificado y con capas paralelas a la superficie del terreno (si hay evidencia de contactos laterales o cambios de pendiente del terreno hay que aplicar corrección).
- Obtiene valores puntuales debajo del punto central entre los electrodos de potencial MN.

Número de mediciones, apilamiento

Con base en el tipo de equipo, generalmente se hace una lectura por cada abertura; sin embargo, es recomendable realizar de tres a cinco mediciones para tener un valor más estable de la medición. Los equipos actuales, multielectrodicos, pueden configurarse para realizar SEV, en este caso el número de mediciones que se hace en cada sitio depende del apilamiento variando a partir de dos mediciones.

Limitaciones

1. Presenta problemas cuando la primera capa es resistiva, por la resistencia de contacto.
2. Potencia del equipo transmisor de corriente.
 - Depende de la intensidad de corriente que inyecta el equipo (si es de baterías o generador de corriente).
 - Equipos de baterías (abertura máxima AB de 800 m, se llega a investigar de 100 a 200 m).
 - Equipo generador de 2.5 a 15 Amperes separación máxima AB de 3 000 m, se llega a investigar a profundidades de 450 a 500 m.
 - Equipo generador de 15 Amperes, se llega a investigar a profundidades de hasta 3 000 m.
2. Las mediciones se ven afectadas cuando la topografía presenta una pendiente mayor de 30° y también cuando el tendido del cable no es completamente recto (hay que realizar correcciones).
3. Antiguamente, por cuestiones de capacidad de los equipos de cómputo en el procesamiento, el número de mediciones se limitaba por década en la escala logarítmica; así como también, para el arreglo electródico Schlumberger la distancia MN debía de ser al menos cinco veces menor que AM.
4. Existe una complicación cuando se realiza SEV sobre extensiones de terreno muy grandes y esto es porque la intensidad de la señal no es lo suficientemente fuerte para alcanzar a medir la resistividad del subsuelo. Esto va a generar la necesidad de hacer empalmes, con el propósito de incrementar el volumen de material a medir. El empalme consiste en aumentar la separación entre los electrodos de potencial MN justo cuando la separación de AM es demasiado grande y de esta manera se va a intensificar la señal transmitida y se va a poder obtener un valor de resistividad con menor rango de error.

Profundidad de investigación

Regla de *dedo* para estimar la profundidad de investigación:

- i. Para arreglo Schlumberger se considera que la profundidad máxima de investigación es del orden de 0.125 a 0.150 el valor de la abertura máxima AB.
- ii. Para el arreglo Wenner es del orden de 0.11 el valor de la abertura máxima AB; sin embargo, depende de las condiciones del terreno.

Fuentes de error

Tendido no recto en la extensión del cable.

Variaciones en la elevación topográfica.

Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo

4.2.2. Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER)

Principio físico

La técnica de TER es un método de resistividad multielectrodo cuyo objetivo específico es determinar la distribución lateral y vertical de la resistividad en el subsuelo.

La base de este método parte de cuatro electrodos, dos de corriente y dos de potencial, pero en este caso se colocan varios electrodos sobre una misma línea con una separación igual para todos. Son conectados con un cable multielectrodo. Se tiene que definir cuál es el inicio y final de la línea para poder hacer una correcta interpretación.

El equipo realiza la medición automáticamente, cambiando los electrodos de potencial y de corriente dependiendo del arreglo a utilizar. Se tiene que configurar en el equipo de medición el número total de electrodos, la distancia entre ellos, el tipo de arreglo a utilizar, así como el número de medidas.

Arreglos electródicos

Dependiendo de la disposición de los electrodos pueden definirse diferentes arreglos. Los más comunes son Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo y se han hecho combinación de estos también para tener por ejemplo el Wenner-Schlumberger. El elegir uno de estos arreglos va a depender del objetivo que se tenga para el estudio. Se tienen que considerar los factores geológicos, la profundidad de investigación y la sensibilidad del arreglo.

- **Wenner (Figura 4.9)**

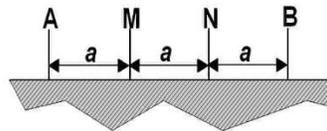


Figura 4.9. Arreglo Wenner

La distancia a entre electrodos varía igual para cada medición, es sensitivo a cambios verticales de resistividad debajo del centro del arreglo y menos sensitivo a cambios horizontales, es decir, es bueno para detectar estructuras horizontales y pobre para las estructuras verticales. La profundidad media de investigación es aproximadamente 0.5 veces el espaciamento a .

Factor geométrico $K = 2\pi a$

- *Wenner -Schlumberger* (Figura 4.10)

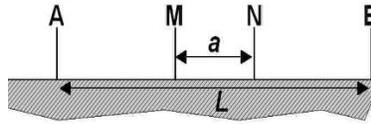


Figura 4.10. Arreglo Wenner-Schlumberger

Los electrodos de corriente $A B$ se alejan una distancia L y los de potencial $M N$ se quedan fijos una distancia a . Es sensitivo tanto a estructuras verticales como a horizontales; es útil en donde se esperan cuerpos con extensión en ambas direcciones. La profundidad de investigación aproximada en este arreglo es la quinta parte de la longitud total del arreglo.

Factor geométrico $K = \pi n(n + 1)a$

- *Dipolo – dipolo* (Figura 4.11)

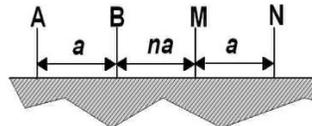


Figura 4.11. Arreglo dipolo-dipolo

Los dipolos de corriente $A B$ y $M N$ están juntos. A y B , M y N van a variar una distancia a mientras que $B N$ van a variar na . Es un arreglo muy sensitivo a los cambios horizontales, pero poco sensitivo para los cambios verticales de resistividad. La profundidad media de investigación ronda entre el 20% y el 30% de la longitud total del arreglo.

Factor geométrico $K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$

- *Polo – dipolo* (Figura 4.12)

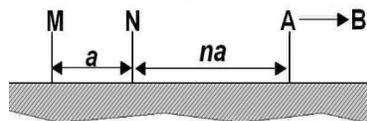


Figura 4.12. Arreglos polo-dipolo

Se tienen los electrodos de potencial $M N$ a una distancia a , mientras que en el caso de uno de los de corriente se envía al infinito. Tiene buena cobertura horizontal.

Factor geométrico $K = 2\pi n(n + 1)a$

Apilamiento

Cada equipo está programado para elegir un número determinado de mediciones que se hagan en el mismo lugar; en la medida que se haga un mayor número de mediciones en una lectura de electrodos, se tendrá una señal más limpia o uniforme y se reducirá la fuente de ruido que se tenga en el sitio. Los equipos pueden realizar desde dos hasta 2^{11} mediciones; en la medida que se hagan más mediciones para tener una lectura más limpia, el tiempo de adquisición será mayor.

Número de mediciones

El número de mediciones depende del tipo de estructura, profundidad y detalle que se requiera.

>**Wenner**. Es el método más rápido: Presenta algunas variantes en cuanto al acomodo de los electrodos; la más común es el Wenner Gama que lleva una estructura similar al arreglo Schlumberger (arreglo centrado donde los electrodos MN están dentro de los electrodos de corriente **Figura 4.13**; Existen otras variantes emulando al arreglo Diplo-Dipolo (no centrado los electrodos MN se colocan a los lados de AB).

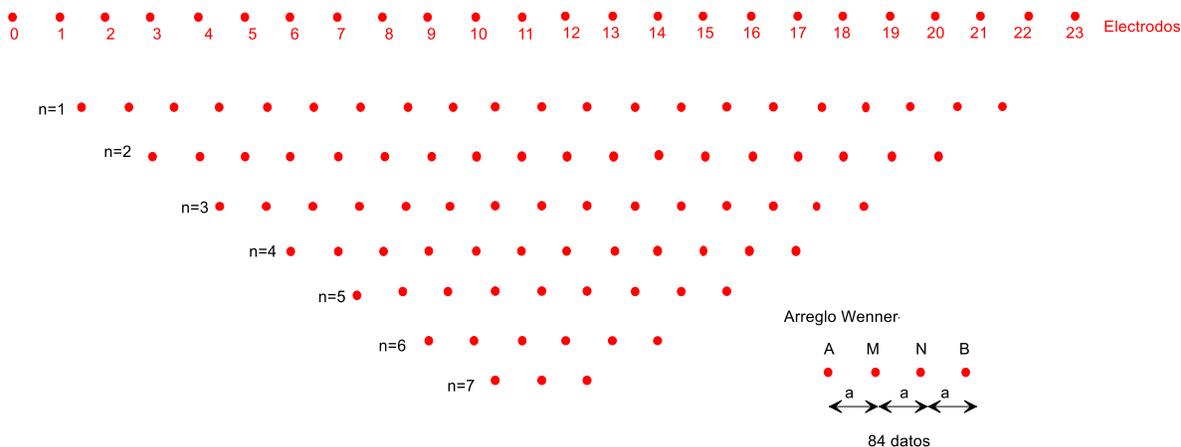


Figura 4.13. Ejemplo del acomodo de electrodos y mediciones con arreglo Wenner Alpha de 24 electrodos

>**Wenner-Schlumberger**. Se utiliza cuando se requiere identificar con mayor claridad capas horizontales y cuasi horizontales (inclinadas), identificación de fallas, vetas de minerales, cavidades, zonas saturadas o arcillosidad. La resolución es buena en estructuras poco profundas. En la **Figura 4.14** se muestra un ejemplo del número de puntos que se pueden obtener del arreglo por nivel; en este caso de hasta 11 niveles.

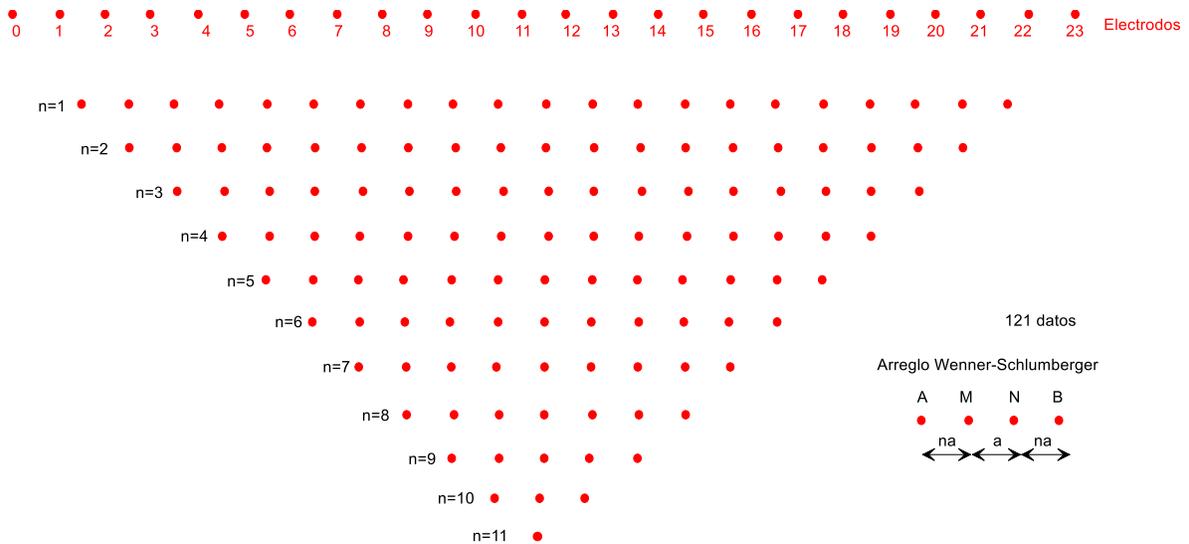


Figura 4.14. Ejemplo del acomodo de electrodos y mediciones con arreglo Wenner - Schlumberger de 24 electrodos

Pueden obtenerse datos entre niveles, dependiendo el número de separación de a . En el siguiente ejemplo se presenta el número de mediciones con inter-niveles para un arreglo de 48 electrodos y 10 niveles de medición. **Figura 4.15.**

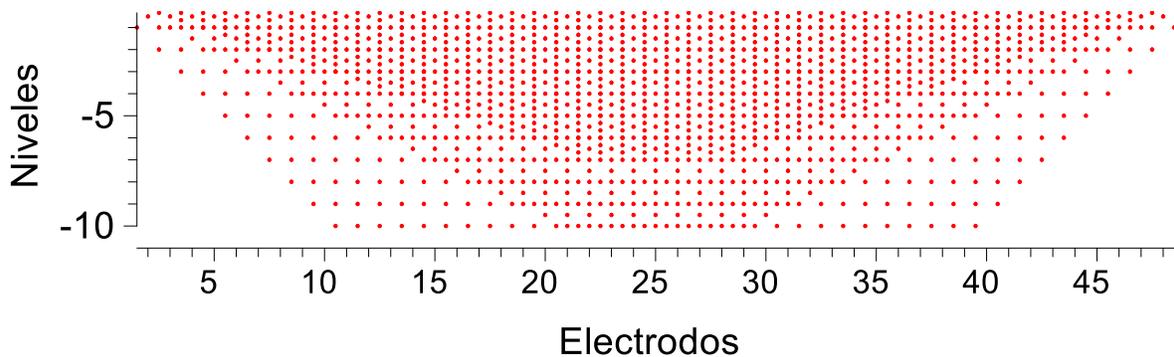


Figura 4.15. Ejemplo del acomodo de electrodos y mediciones con arreglo Wenner - Schlumberger de 48 electrodos, 10 niveles y medición inter-nivel

>Dipolo-Dipolo. Se utiliza cuando se requiere detalle en estructuras verticales (fallas, dislocamientos, vetas de minerales y cavidades). La limitación que presenta es que la profundidad de investigación se ve afectada por la disminución del potencial; a mayor distancia del dipolo está afectado fuertemente por ruido. En la **Figura 4.16** se muestra un ejemplo del número de mediciones que se pueden obtener del arreglo, sin considerar mediciones entre niveles.

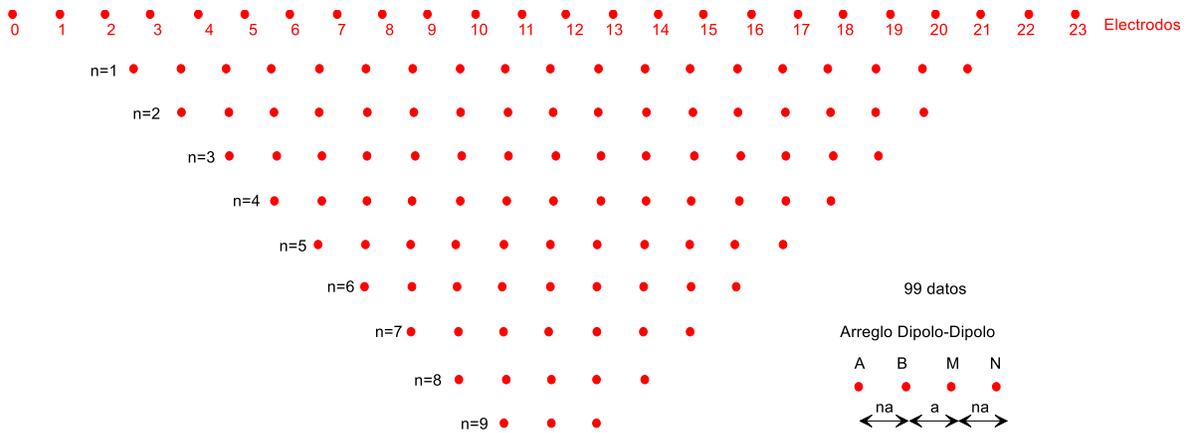


Figura 4.16. Ejemplo del acomodo de electrodos y mediciones con arreglo Dipolo-Dipolo de 24 electrodos

Roll Alone

Término que se utiliza cuando la longitud del tendido a realizar supera la distancia del número de electrodos que se tiene para realizar la medición.

La técnica consiste en sobreponer (desplazar los electrodos una cierta distancia del electrodo inicial de medición) para cubrir la longitud programada y el equipo sólo medir el número de puntos que se desplazaron.

Como se puede ver en la **Figura 4.17**, dependiendo del número de electrodos a desplazar (puntos en color negro), se tendrá mayor o menor detalle a profundidad; en este caso se puede observar que debajo del nivel 7 en se presentan zonas donde no hay información entre el tendido.

Para fines prácticos se recomienda que el desplazamiento sea 1/3 de la longitud del tendido del número de electrodos que se tiene para realizar la medición; por ejemplo, para un tendido donde se tenga que medir 32 electrodos y sólo se tengan 24 electrodos de medición, desplazar 8 electrodos.

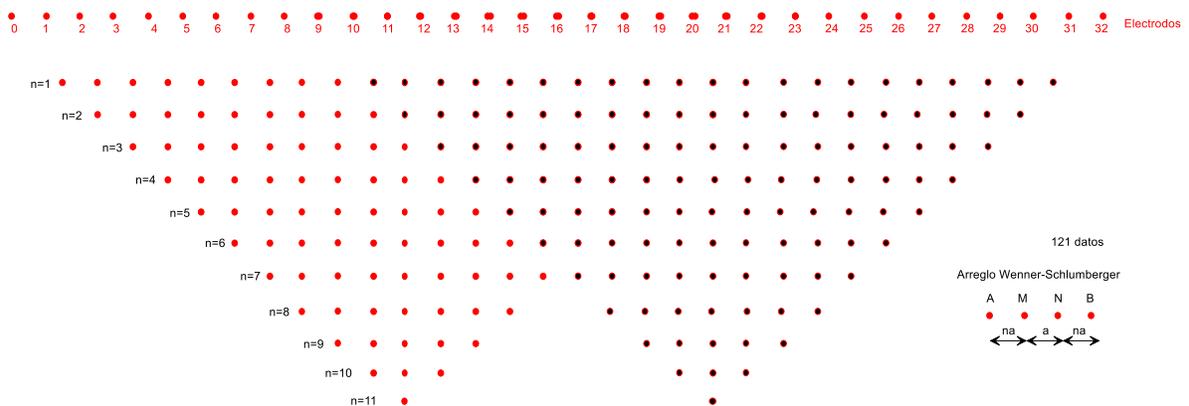


Figura 4.17. Ejemplo de *Roll Alone* para el arreglo electródico Wenner-Schlumberger para 32 electrodos, considerando que solo se cuenta con 24 electrodos para realizar el levantamiento geofísico.

Profundidad de investigación

Está en función de la longitud del arreglo y separación de electrodos.

La profundidad media de investigación se considera como la profundidad en donde la mitad de la contribución de la señal medida viene de la parte de arriba del medio y la otra mitad debajo de este. Este criterio ha sido bien aceptado por autores como Loke (2010) quien ha publicado tablas en donde se puede calcular la profundidad media de investigación para los arreglos más populares, en función de la separación de los electrodos o longitud del arreglo.

La profundidad de investigación teórica depende del tipo de arreglo utilizado y de la relación que exista entre la separación de los electrodos exteriores.

Para el arreglo Wenner Alpha es de $1/6$ de la mayor abertura AB que se realice en el tendido.

Para el arreglo Wenner Schlumberger es de $1/5$ de la mayor abertura AB que se realice en el arreglo.

Para el arreglo Dipolo-Dipolo es de $1/5$ de la mayor distancia que se utilice en la abertura AB.

Para el arreglo Polo Dipolo es del orden de $1/3$ de la longitud del arreglo electródico que se realice.

Hay que aclarar que la mayor abertura o mayor distancia se refiere al número de electrodos que puede medir el equipo cuando todos están conectados y también depende de la capacidad del equipo de medición para medirlos. Hay tendidos que pueden tener una mayor longitud y es cuando se utiliza *Roll Alone*, en este caso la profundidad de investigación se limitará al número de electrodos que pueda medir: por ejemplo, se desea realizar un TER de 295 m con separación de electrodos a cada 5 m, arreglo Wenner-Schlumberger, y sólo se cuenta con 48 electrodos. Para realizar los 295 m del tendido se requieren 60 electrodos, lo que implica que se tendrá que realizar un *Roll Alone* para cubrir 12 los electrodos faltantes; la profundidad de investigación será con base en la longitud que den los 48 electrodos conectados. Lo anterior implica que la profundidad de investigación real será del orden de los 45 m y no de los 60 m.

La función de sensibilidad da una idea de qué tanto se va a afectar el potencial medido en determinado arreglo, si el semiespacio homogéneo sufre una variación de la resistividad en un pequeño volumen dentro del subsuelo. (Furman, A., Ferre, T. y P. A. Warrick, A.W., 2003). Estos autores hacen un análisis de los diferentes arreglos electródicos utilizados en la TER; comentan que un mapa de la distribución de medida de sensibilidad se puede construir basado en la sensibilidad de diferentes arreglos para simples perturbaciones de conductividad individuales ubicadas en el subsuelo. Estos mapas muestran la distribución de la sensibilidad del arreglo. La distribución de sensibilidad espacial es una propiedad del arreglo y no cambia con las propiedades de perturbación; solo la magnitud de la función de respuesta cambiará. La polaridad de la función de respuesta también cambia, pero la función de sensibilidad permanecerá sin cambios y será positiva. En la **Figura 4.18** se muestra un ejemplo de mapas de sensibilidad para los arreglos considerados en este trabajo.

En la **Figura 4.19** se muestran las curvas de sensibilidad normalizadas para los diferentes arreglos. Los resultados muestran que el arreglo Dipolo-Dipolo tiene sensibilidad concentrada cerca de la superficie del suelo. Las matrices de Wenner y Schlumberger tienen sensibilidades muy similares con una mejor cobertura a mayor profundidad.

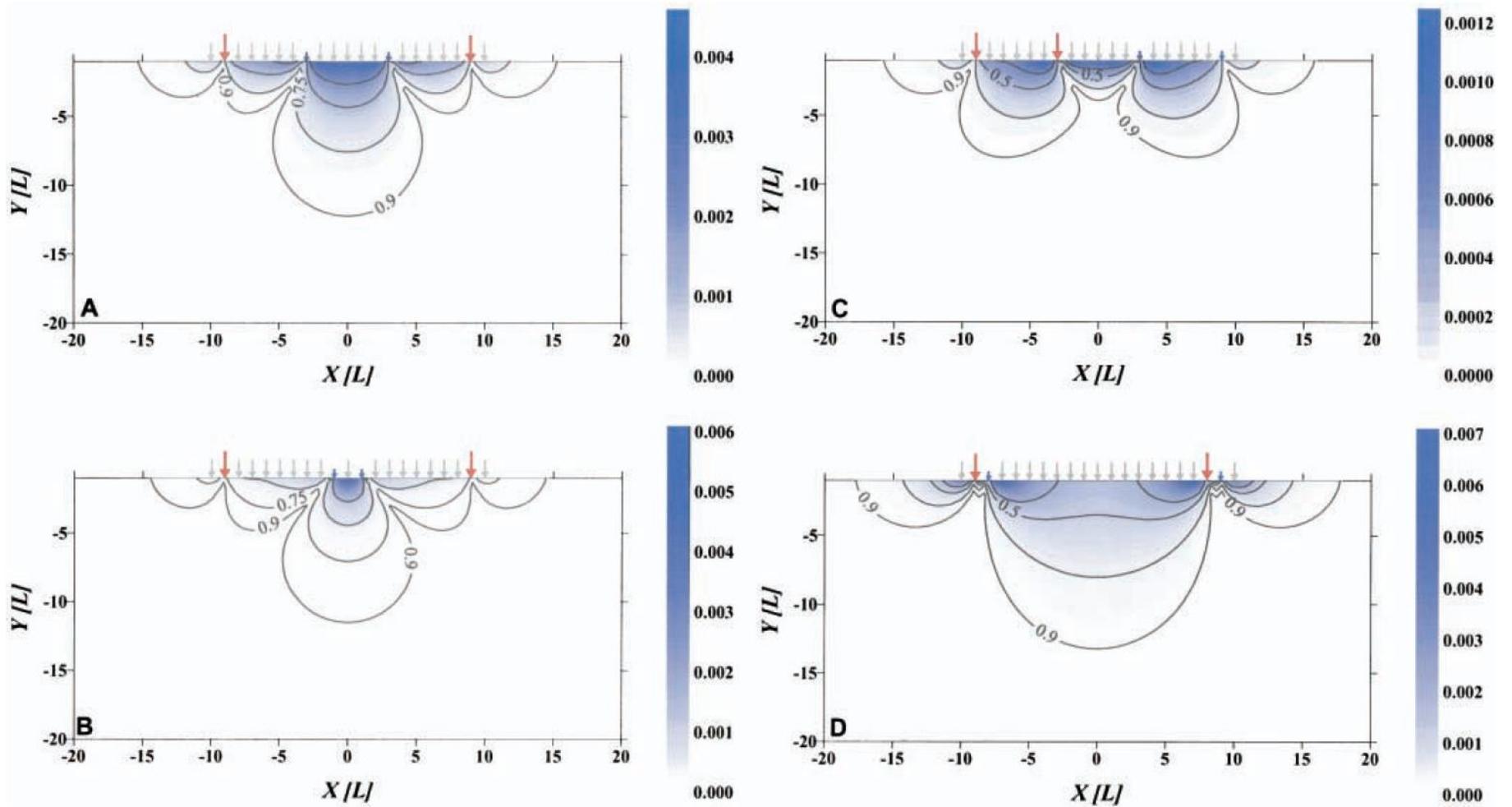


Figura 4.18. Mapas de sensibilidad para (A) Wenner, (B) Schlumberger, (C) Dipolo-Dipolo doble y (D) matrices parcialmente superpuestas. Se muestran los contornos de la sensibilidad acumulada en relación con la sensibilidad total.

(Tomado de Furman, A., Ferre, T y P .A., Warrick, A.W., 2003)

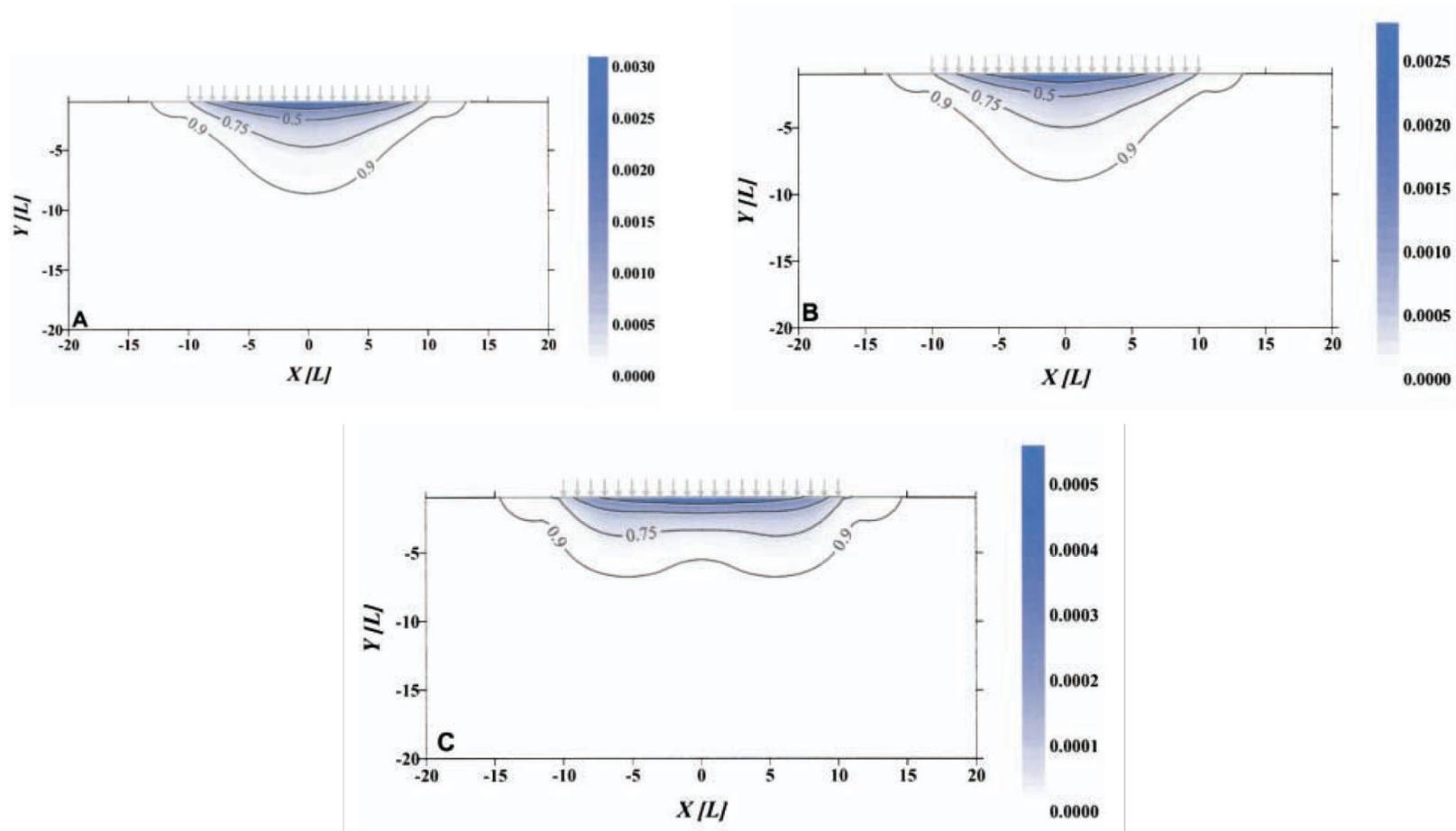


Figura 4.19. Mapas de sensibilidad normalizados para los arreglos Wenner, Wenner-Schlumberger y Dipolo-Dipolo.
 (Tomado de Furman, A., Ferre, T y P .A., Warrick, A.W., 2003)

Fuentes de error o incertidumbre

Mal contacto de los electrodos.

Ruido ambiental por líneas de alta tensión.

Ruido que presenta el equipo de medición en función de la separación de electrodos AB y MN.

Topografía.

Tendido no recto en la extensión del cable.

Separación variable entre electrodos.

La geometría de los cuerpos a identificar en el subsuelo generalmente se conoce, como tuberías, cavidades, estratos de rocas, nubes de dispersión de contaminantes, entre otros, se conoce también con precisión la ubicación de los electrodos al georreferenciarse. Lo anterior, por lo general, está controlado por un sistema y programa de cómputo; sin embargo, en situaciones de flujo en tuberías, por lo general no se considera esta situación, limitándose únicamente al arreglo de los electrodos y no se consideran las variaciones al campo eléctrico que pueda generar el flujo del fluido. (Lehikoinen, A., 2012.).

4.2.3. Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM)

Principio físico

EL TEM mide la respuesta electromagnética del subsuelo a variaciones rápidas de un campo magnético primario, producidas por pulsos de corriente eléctrica en una bobina. El campo producido genera corrientes inducidas en el interior de la Tierra que se disipan al paso del tiempo produciendo un campo magnético secundario cuyo tiempo de atenuación está directamente relacionado con la resistividad eléctrica en el subsuelo. Este campo magnético secundario producirá una variación de voltaje que va a ser captada por una bobina receptora.

Figura 4.20.

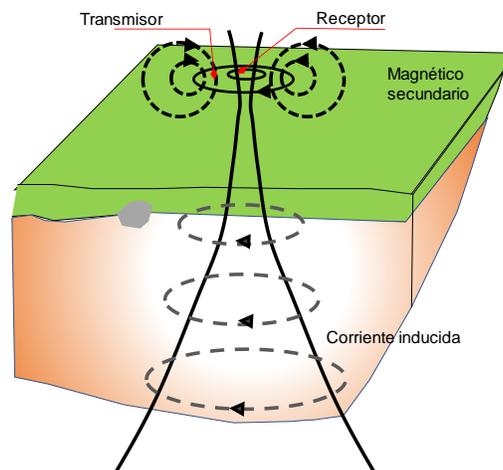


Figura 4.20. Principio físico del TEM

En medios poco conductores, los voltajes iniciales serán altos, pero el campo decaerá rápidamente. La función emitida por el transmisor será de tipo escalón, que va a ser generada al hacer circular una corriente constante durante un cierto tiempo y que, al ser interrumpida abruptamente, teniendo un tiempo de espera equivalente en magnitud al usado al enviar la señal, generará una señal de tipo rampa en los extremos. Después se vuelve a transmitir la misma corriente, pero con la polaridad invertida, formando así una señal tipo escalón. **Figura 4.21.**

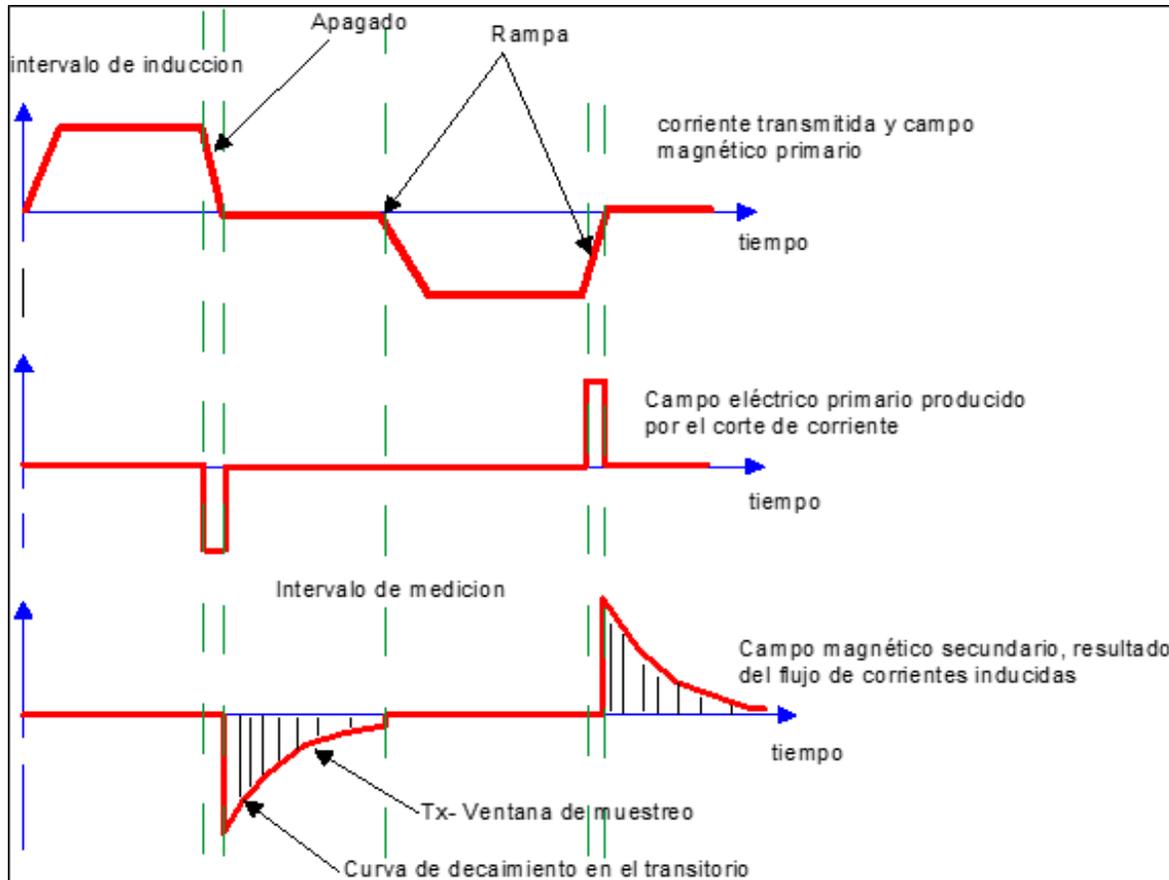


Figura 4.21. Adquisición de datos. Ilustración de la salida del transmisor durante el proceso de medición, el voltaje inducido en el subsuelo y el decaimiento del campo magnético (Cristiansen et al., 2006).

Arreglos de bobinas

La medición de un TEM requiere que se construya una bobina (*Loop*) la cual es un cable tendido en forma preferentemente cuadrada, de cierta longitud por lado. Se puede usar una o más de una bobina dependiendo el arreglo y el detalle de la adquisición del dato.

- a) **Sencilla:** En este arreglo se utiliza una bobina que sirve como transmisora y receptora donde la corriente fluye, esta actúa como receptora una vez que la corriente se corta los extremos de la bobina son conectados al receptor y la señal transmitida puede ser medida. **Figura 4.22.**

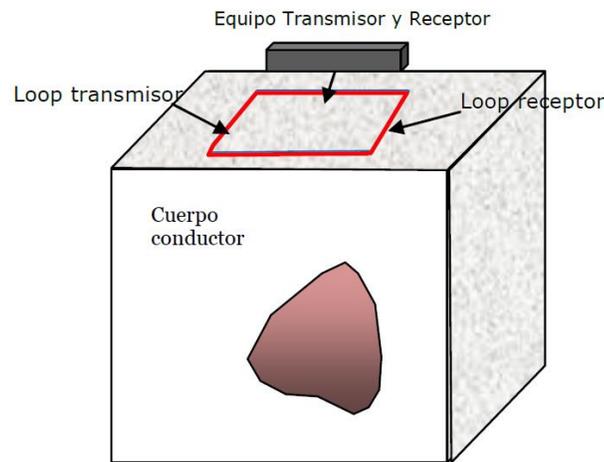


Figura 4.22. Bobina de medición sencilla

- b) **Coincidente:** En este arreglo el transmisor y el receptor son bobinas distintas que coinciden en el tendido las cuales son conectadas al receptor y transmisor respectivamente. Se recomienda que la bobina receptora sea un poco de menor tamaño y no se sobreponga a la bobina transmisora. **Figura 4.23.**

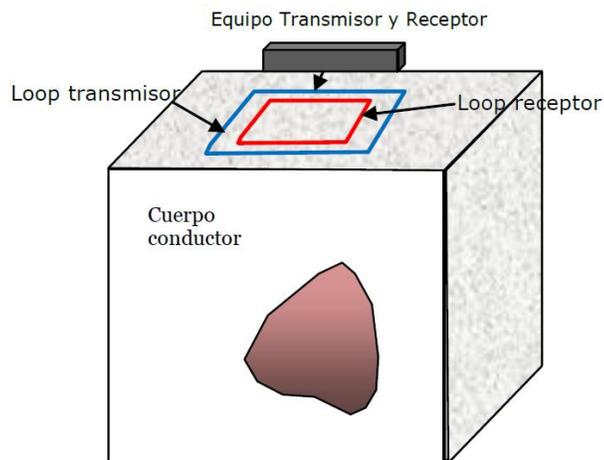


Figura 4.23. Bobina de medición coincidente

- c) **In-loop** este arreglo es una variante de la bobina coincidente en el cual se utiliza un dipolo receptor localizado en el centro de la bobina transmisora. **Figura 4.24.**

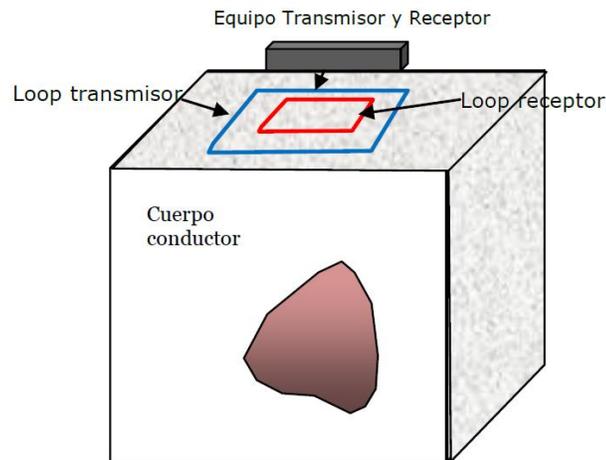


Figura 4.24. Bobina de medición central (*In-Loop*)

- d) **Bobinas separadas** en este arreglo la bobina transmisora y la receptora están separadas una distancia fija. **Figura 4.25.**

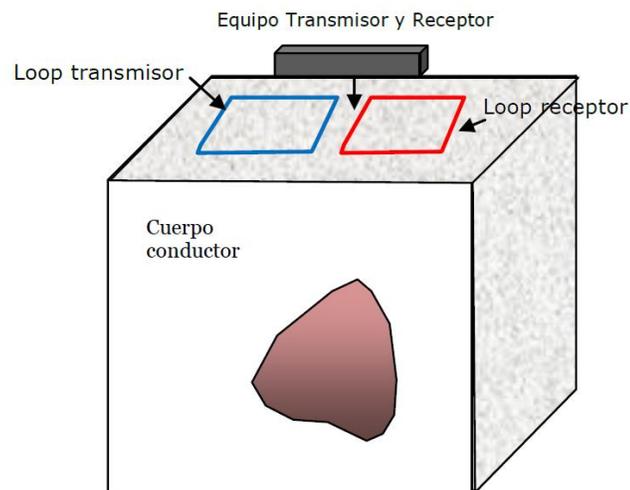


Figura 4.25. Bobina de medición separada

Hay que tomar en consideración que en campo las formas de las bobinas TR y TX, a veces, por las condiciones del terreno y topografía no se construye una bobina cuadrada, por lo que es necesario realizar el levantamiento topográfico con un GPS a través del *Track* para determinar el perímetro y área de la bobina.

Con fines explicativos, supóngase que para una investigación se considera una bobina cuadrada de 100x100 m; sin embargo, las condiciones del terreno sólo permiten construir una bobina de tipo rectangular de 60x140 m; el perímetro en ambas bobinas será de 400 m, pero

las áreas serán de 10 000 y 8 400 m², respectivamente; asimismo, si se considera por ejemplo una bobina circular de 400 m de perímetro, tendrá un radio de 63.64 m y equivale a un área de 12 716 m². Con base en lo anterior cualquier figura geométrica cuasi -cuadrada tendrá un área menor al de un cuadrado.

Esta consideración es importante ya que el cálculo de la resistividad está función, entre otros, del área de la bobina.

Perfilaje

Si bien el TEM es una técnica que obtiene valores puntuales (bajo el centro de la bobina), se puede realizar perfilaje para conocer las variaciones laterales de la propiedad. Para este caso es recomendable realizar mediciones siempre sobre una línea recta sobreponiendo las mediciones por lo menos el 50% de la longitud del lado de la bobina. Es necesario, en esta situación que las bobinas sean lo más cuadradas posibles para reducir el ruido que se genere por la geometría de la bobina. En la **Figura 4.26** se presenta un ejemplo de la forma en que se puede realizar un perfilaje, considerando en éste, un arreglo de bobina sencilla.

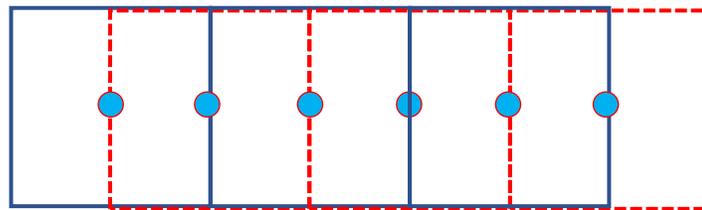


Figura 4.26. Ejemplo del arreglo de bobinas (sencillas) para un perfilaje con cubrimiento del 50% del lado de la bobina)

Apilamiento

Es una parte importante para la calidad de la señal. Indica el número de mediciones que deben hacerse por ventana; se puede realizar mediciones 2ⁿ dependiendo de la calidad de señal que de quiera obtener. Al incrementar el valor de n se reduce el ruido.

Número de mediciones

Por lo regular al inicio de una campaña de medición con TEMs es necesario tener un pozo de calibración, que permita correlacionar las diferentes capas o cuerpos obtenidos e interpretados (TEM), con la información real del subsuelo. Se ha visto que el TEMs es muy susceptible a variaciones por ruido cultural, hora del día, época del año (verano – invierno), tormentas eléctricas, nubosidad en el ambiente y viento.

Cristiansen et al., (2006) indican que un simple TEM está afectado significativamente por ruido cultural, entendiéndose como ruido cultural a las variaciones en la señal electromagnética ocasionadas por líneas de transmisión de alta tensión, antenas de recepción de telefonía y televisión, motores en operación que se ubican en el entorno de la bobina que está adquiriendo información. Ellos realizaron una medición en un solo sitio obteniendo 5 000 curvas, todas con la misma ganancia y apilamiento. El análisis indica que cada una tiene una respuesta diferente; identifican que un sondeo con 5 000 TEM apilados tiene una relación

señal/ruido mucho mejor, que una de 50 TEMs. En la **Figura 4.27** se presenta el resultado del experimento que realizaron.

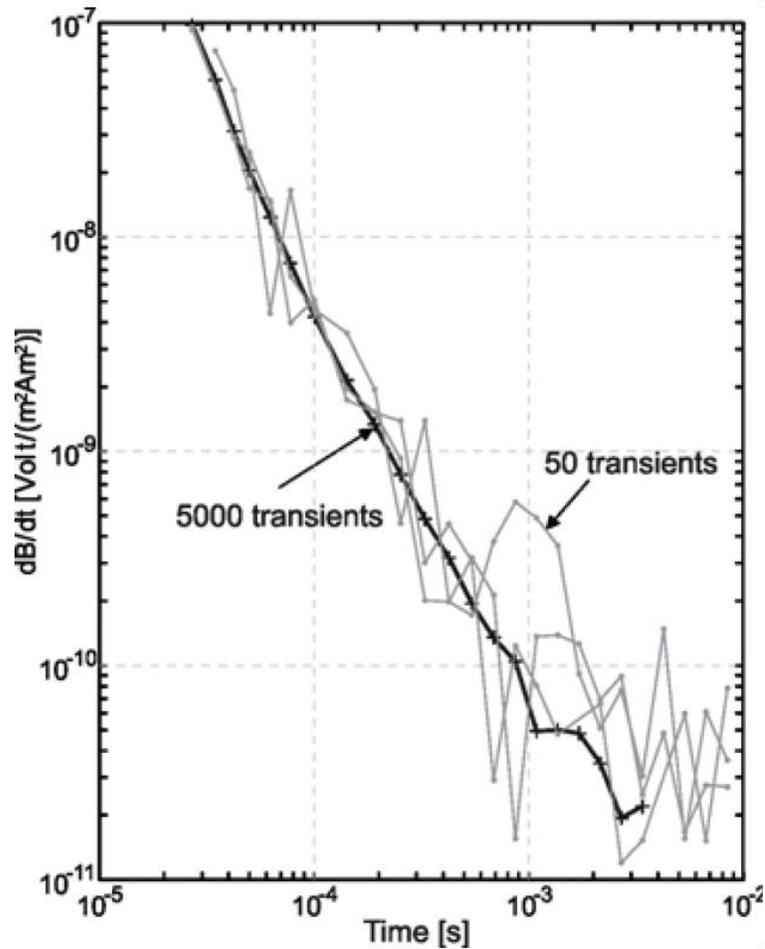


Figura 4.27. Ejemplo de curvas con menor y mayor apilamiento en un mismo sitio. Con línea negra se ve la curva promedio de las 5 000 mediciones y con líneas grises TEMs con 50 apilamientos. (Tomado de *Cristiansen et al.*, 2006).

Con base en lo anterior, para fines de ingeniería e independientemente del tamaño de la bobina, se sugiere que los TEMs se obtengan en función del tiempo de adquisición y no de la señal individual o número de mediciones. Lo anterior, aunado a incrementar el apilamiento, permitirá tener una señal con menor cantidad de ruido. El tiempo mínimo por cada medición, una vez colocada la bobina, seleccionadas las ventanas, ganancia y parámetros de adquisición, deberá ser por lo menos de 30 a 60 minutos por sitio; hay que considerar que a medida que la bobina y la serie de adquisición es de mayor tamaño y tiempo, el equipo demanda mayor tiempo en la adquisición de las ventanas que se estén midiendo

Ruido

En el inciso anterior se mencionan algunas fuentes de error. Hay varias fuentes de ruido electromagnético entre ellas, las señales electromagnéticas por debajo de 1 Hz que provienen primordialmente de la ionósfera. Por arriba de 1 Hz el espectro de ruido natural se debe principalmente a los esféricos que son ruido electromagnético transitorio generado por descargas eléctricas. El ruido que produce el hombre debido a la red eléctrica se encuentra en el rango de frecuencias de 50-60 Hz, las estaciones de radio en frecuencias de 10-25 kHz. El ruido por movimiento inducido o microfonía se debe al movimiento de los sensores de campo magnético en el campo magnético terrestre, es importante debido a que es mucho mayor a los campos usados por el sondeo; se conoce como ruido de viento y es muy común en los sistemas aéreos.

Lo anteriormente dicho es útil para comprender el fenómeno electromagnético en el subsuelo y entender las variaciones que puede tener la resistividad debido a todos los procesos que se realizan para obtenerla. Con esto se puede tener un mejor control sobre la elección del lugar para realizar los sondeos, así como comprender (en campo) el comportamiento de la resistividad obtenida para asegurar que la adquisición de datos realizada sean datos con alta calidad y lograr un buen procesamiento que facilite la interpretación de los resultados.

Medición de ruido

En la etapa de adquisición es necesario obtener al menos una medida del ruido al término de la medición en el sitio deseado; sin embargo, si se obtienen al inicio y término es mucho mejor dado que el ruido es aleatorio se puede obtener un valor promedio de éste y tener una idea de las condiciones que se presentan en el sitio. Hay que mencionar que no todos los equipos obtienen la señal, Por ejemplo, el equipo Tem-Fast obtiene una curva Err [V/A], la cual es útil para determinar la calidad de la curva medida.

Serie de tiempo para la adquisición de datos

Define el número y el ancho de los intervalos de tiempo en los cuales el equipo realiza la medición (ventanas), dentro de los cuales se promedian los datos adquiridos. Cada equipo presenta de una a más de una serie dependiendo de la resolución, profundidad de investigación y las condiciones del ruido ambiental.

Las series de tiempo se clasifican de alta a baja resolución y de menor a mayor profundidad de investigación. Las de alta resolución contienen intervalos de muestreo en tiempos cortos y se aplica para profundidades cortas; en tanto las de menor resolución (o mayor tiempo de adquisición) tienen una mayor profundidad de investigación, mayor tiempo de adquisición y por lo tanto las ventanas son más anchas (mayor intervalo de tiempo entre ventanas).

Las series de tiempo de alta resolución contienen más y más estrechos intervalos de tiempo (ventanas) y las series de tiempo largas contienen menos ventanas y son más anchas.

La selección de la serie de tiempo apropiada depende de la profundidad de la investigación y las condiciones de ruido ambiental.

En la **Figura 4.28** se muestran las series de adquisición de algunos de los equipos de adquisición de datos, donde cada punto representa el tiempo de muestreo de la señal en la ventana.

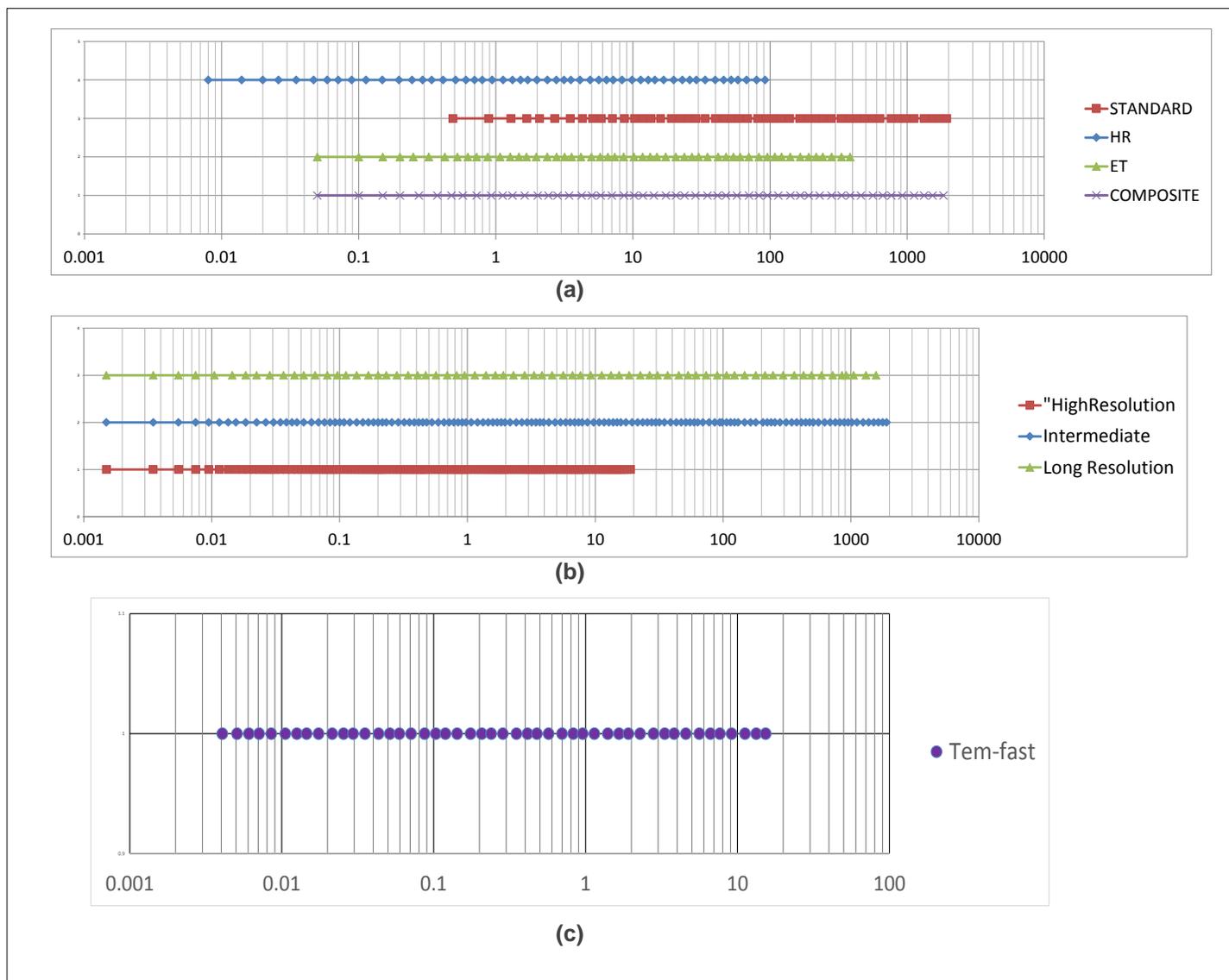


Figura 4.28. Series de tiempo para la adquisición de datos para los equipos (a) Sirotem; (b) Terratem, c) Tem-Fast. La unidad de medición de las ordenadas es en mseg.

Profundidad de investigación

El tamaño de la bobina condiciona, en parte, la profundidad de investigación, así como también, el tiempo de adquisición, el medio, equipo. En la **Figura 4.29** se muestra la forma en como penetran las corrientes inducidas al subsuelo.

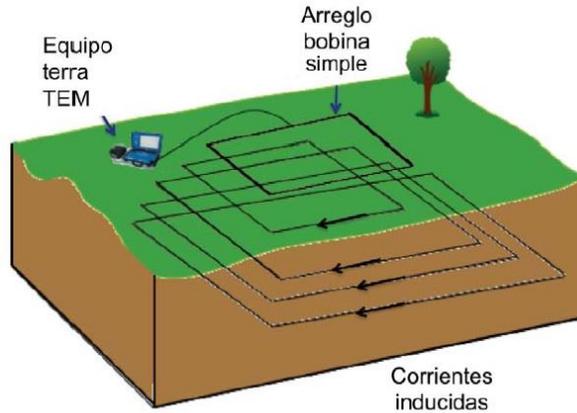


Figura 4.29. Forma de penetración de las corrientes inducidas

Una bobina de gran tamaño generalmente funciona mejor para mayor penetración, esto es debido a que el momento del trasmisor y la fuerza del campo primario asociado se incrementan al agrandar el tamaño de la bobina, el decaimiento del campo magnético de una bobina grande se aproxima a $1/r$ donde r es la distancia entre la bobina y el objetivo enterrado. El decaimiento del campo magnético para una bobina pequeña es $1/r^3$. Se puede estimar el desempeño de varios sistemas tomando en cuenta que el cuerpo conductor y la fuente de ruido son pequeñas; el decaimiento del campo magnético secundario es aproximado a $1/r^3$. En la **Tabla 4.2** se muestran los decaimientos del campo electromagnético según el tamaño de la bobina. (Nabighian y Macnae, 1991).

Tabla 4.2. Decaimiento del campo electromagnético

Bobinas grandes	Bobinas pequeñas
$b_s \sim 1/r$	$b_s \sim 1/r^3$
$b_t \sim 1/r_t^3$	$b_t \sim 1/r_t^3$
$b_n \sim 1/r_n^3$	$b_n \sim 1/r_n^3$

Donde, r_t y r_n representan la distancia entre el receptor al objetivo y la fuente de origen de ruido geológico, b_s representa la fuerza del campo magnético primario, b_t y b_n representan la fuerza de los campos secundarios debido al objetivo y a la fuente de ruido geológico.

Debido a que en campo las bobinas, por lo regular, no son cuadradas dado a que en muchos sitios las condiciones del terreno son complicadas, es necesario conocer las dimensiones de la bobina que se construyó. En el inciso de arreglo de bobinas se da la justificación.

La profundidad de un sondeo se puede relacionar también con las frecuencias y tiempo de adquisición.

El *Skin Depth* es una medida de la penetración que un frente de onda electromagnética mantiene en un material. La magnitud del campo electromagnético será proporcional en una cantidad exponencial $e^{-x/\delta}$ donde δ es el Skin-Depth y x es la distancia desde la superficie del material donde la onda incide hasta el espesor de este. En la **Figura 4.30** se muestra el *Skin Depth* en dos medios.

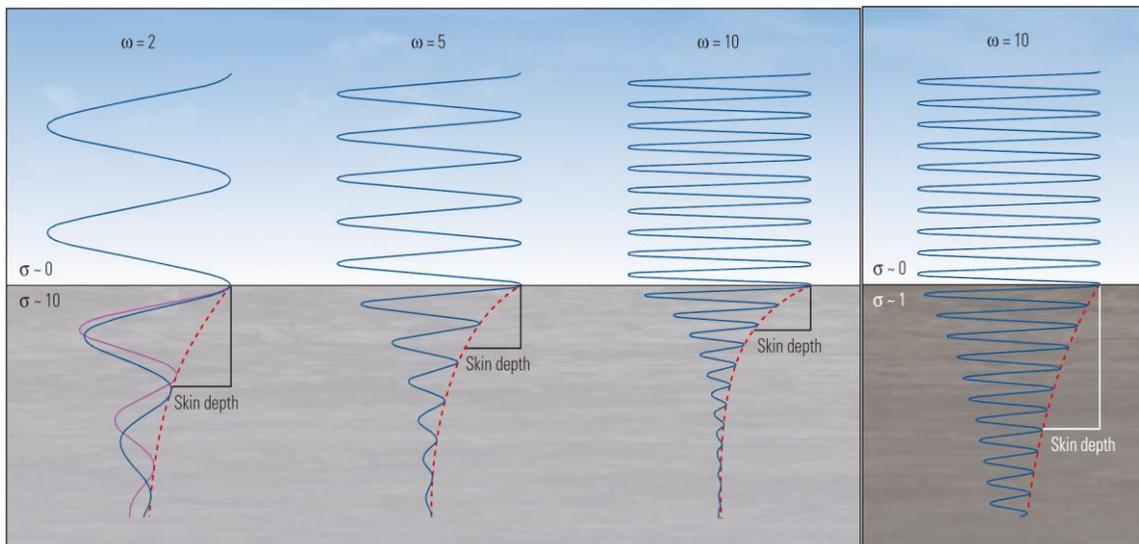


Figura 4.30. Skin Depth (Presentación Geotem Ingeniería)

Este efecto de anchura de penetración o *Skin Depth* relaciona el rápido decaimiento de los campos electromagnéticos dentro del medio conductor y dice algo sobre la profundidad de investigación de acuerdo con el uso de la herramienta de prospección electromagnética que se utilice.

Para el caso de TEM el *Skin Depth* está dado por:

$$\delta_{TEM} = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}}$$

Donde : t = Tiempo de decaimiento
 μ = Permeabilidad Magnética
 σ = Conductividad Eléctrica

La penetración del campo dependerá del periodo de sondeo y de la conductividad de las estructuras en la Tierra, siendo que a una mayor frecuencia la profundidad es menor y a menor frecuencia mayor profundidad según Vozoff (1972).

Con el propósito de ilustrar este concepto se plantea el siguiente ejemplo. Se considerarán tres cuerpos que presentan resistividades de 10, 100 y 1 000 Ohm-m y se considerarán las series de tiempo mínimos y máximo de los equipos Terratem, Sirotem y TemFast (Ver Figura 4.27). En la **Tabla 4.3** se muestran los resultados.

Tabla 4.3. Ejemplo de profundidad de investigación con base en el tiempo de adquisición

Skin Depth (m)	R (Ohm-m)	t (seg)	μ (H/m)	Serie
4.89	10	0.0000015	1.25664E-06	High Resolution
564.19	10	0.02	1.25664E-06	
1,261.57	10	0.1	1.25664E-06	
15.45	100	0.0000015	1.25664E-06	High Resolution
1,784.12	100	0.02	1.25664E-06	
3,989.42	100	0.1	1.25664E-06	
48.86	1 000	0.0000015	1.25664E-06	High Resolution
5,641.90	1 000	0.02	1.25664E-06	
12,615.66	1 000	0.1	1.25664E-06	
5,641.90	10	2	1.25664E-06	Composite/ Long/Standard/ Intermediate
17,841.24	100	2	1.25664E-06	
56,418.96	1 000	2	1.25664E-06	

Con base en lo anterior, como se ve, el tiempo es un factor importante en la profundidad de investigación que se desea y por lo tanto la serie de tiempo que se elija para la medición será un elemento de restricción y de planeación. Este ejemplo considera que la señal de adquisición obtiene datos sin ruido en todas las ventanas. Dado que una señal real presenta ruido, la profundidad de investigación se reduce por las variaciones que presenta la señal, ver Figura 4.26.

Con base en la experiencia que se tiene en Hidrogeofísica, los tiempos de adquisición oscilan entre los 100 y 200 milisegundos. (Christiansen, A.V., Auken, E. and Sørensen, K. 2006).

Fuentes de error e incertidumbre.

Error geométrico. La relación geométrica entre la fuente y el receptor genera ruido. Los efectos topográficos son otra forma de ruido sistemático, a pesar de que el anillo de humo o *Smoke Ring* se llega a comportar como si la tierra fuera un medio plano. Esto último se refiere a que habrá que realizar la corrección correspondiente en cuanto a la pendiente o rugosidad del terreno. Lo anterior implica que es necesario conocer la geometría de la bobina que se realice en el sitio y la pendiente del terreno

Efectos culturales. Las corrientes que se inducen en conductores metálicos como líneas telefónicas o líneas de corriente, tuberías bardas, etc., pueden producir

respuestas anómalas. El problema con estas fuentes de ruido es su posibilidad de canalizar las corrientes a las rocas a su alrededor. Su respuesta puede ser minimizada situando los arreglos simétricamente distribuidos a lo largo de la fuente de ruido.

4.2.4. Otros métodos

Magnético

Mide el campo magnético de la Tierra, asociado con una estructura geológica o construida por el hombre. Si bien, los acuíferos no presentan una firma magnética, su uso se enfoca principalmente a estudios a nivel regional para identificar la cuenca hidrológica e hidrogeológica y con base en el análisis en conjunto (Hidrogeofísica-Hidrogeología), se pueden identificar zonas con potencial hidráulico subterráneo (Reséndiz O., P.A., 2015); por ejemplo, en rocas de origen volcánico. Se aplica también en la identificación de anomalías asociadas a contaminación de cuerpos metálicos enterrados, así como en la identificación de fallas en el basamento que puedan representar trayectorias preferenciales en el flujo del agua. Esa útil para identificar zonas asociadas a cuencas sedimentarias.

El campo magnético de la Tierra se origina en la parte fundida del núcleo, varía de manera suave y predecible sobre la superficie de la Tierra y está definido convencionalmente por el Campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF). El campo, en cualquier punto se define por la Intensidad de Campo Total (T), su inclinación (I) y la desviación entre el norte verdadero y magnético, declinación (D).

En relación al método, el manto de la Tierra es muy caliente por lo que no presenta magnetismo, debido a este se pierde cuando la temperatura está por encima del punto Curie (550 a 600 °C). En cuanto a las rocas de la corteza, al enfriarse el material proveniente del manto este se magnetiza con base en las condiciones que presenta el campo magnético en el momento de tener una temperatura por debajo del punto de Curie. Dado que se presentan diferentes emisiones lávicas en diferentes momentos y épocas geológicas, los valores del magnetismo de las rocas varían en intensidad y orientación. La exploración magnética mide la magnetización remanente (cuando se formó o recalentamiento por metamorfismo); puede medir también la magnetización inducida (asociada a un magnetismo que adquiere el cuerpo que es susceptible a magnetizarse cuando está junto a un cuerpo que presenta magnetismo natural).

La unidad de medida es la susceptibilidad magnética y se define como el grado en que las partículas minerales pueden magnetizarse. Las rocas en cuanto a su composición presentan diferentes valores.

Esta técnica se aplica a nivel regional a través de vuelos en helicóptero o avión. Las mediciones se realizan con magnetómetros (Fluxgate o precesión nuclear). La unidad de medida es el nT (nano Tesla).

El procedimiento de adquisición consiste en obtener datos en intervalos de distancia o tiempo definidos en líneas con espaciamiento equidistante definido, por ejemplo, un vuelo magnético puede ir sobre la superficie del terreno de 50 a 100 m lo que implica que la separación entre líneas sea de 200-250 o 400-500 m respectivamente (Kovalevsky, V.S., et al, 2004).

Los resultados se presentan como perfiles o mapas en los cuales se pueden identificar anomalías que son la base para la interpretación. En la **Figura 4.31** se muestra un ejemplo de un análisis magnético-hidrogeológico donde se pueden identificar áreas de oportunidad para realizar la perforación de pozos con fines de abastecimiento de agua.

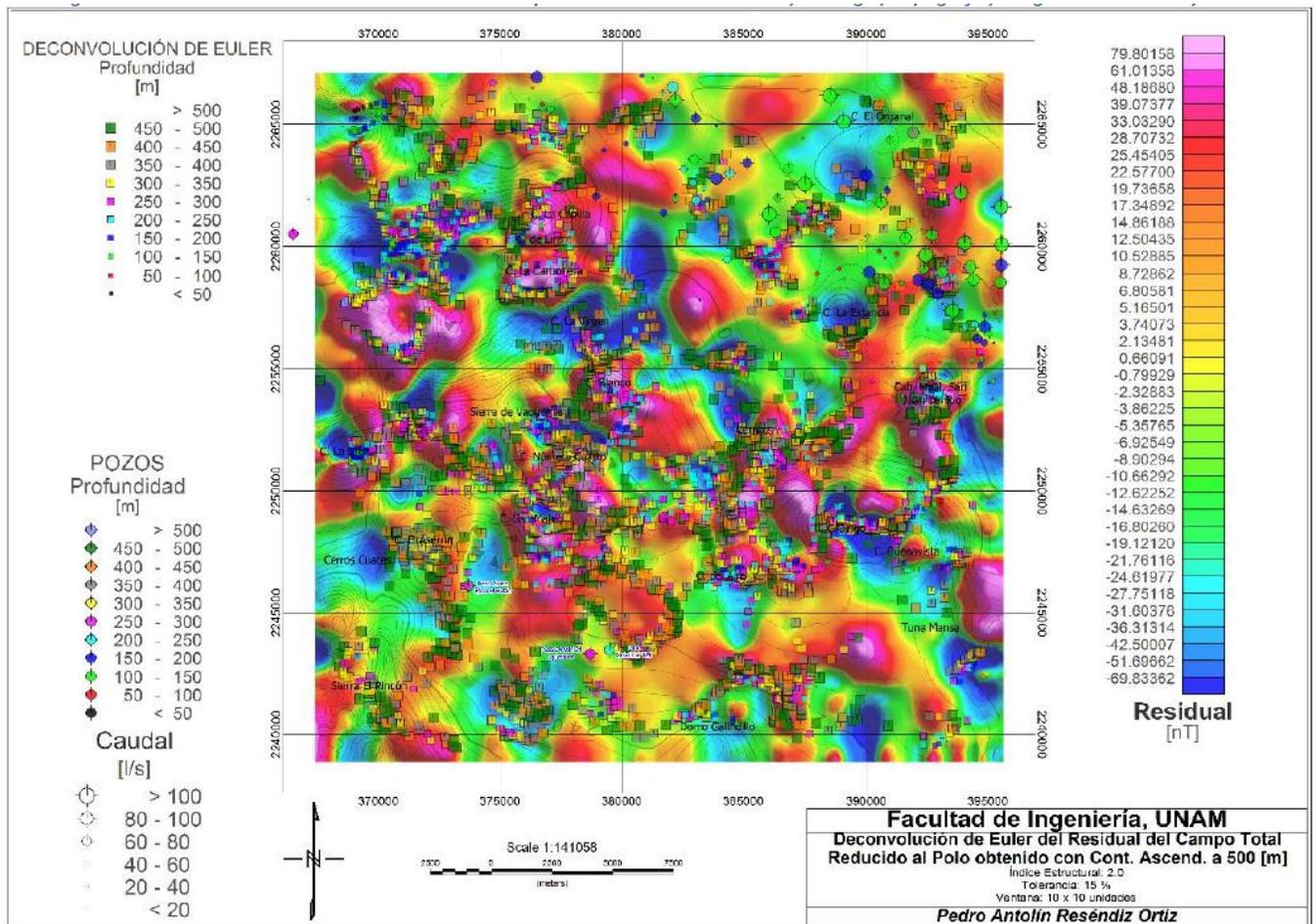


Figura 4.31. Aplicación de la magnetometría en la hidrogeología (Reséndiz O., P.A., 2015)

Gravimétrico

Este método se usa para determinar las variaciones de la densidad de los materiales del subsuelo a través de la medición de la gravedad o micro gravedad. Es útil para mapear cuencas sedimentarias (nivel regional) o, para determinar variaciones (nivel local) de contactos roca densa-material aluvial, detección de cavidades y carsticidad, entre otros.

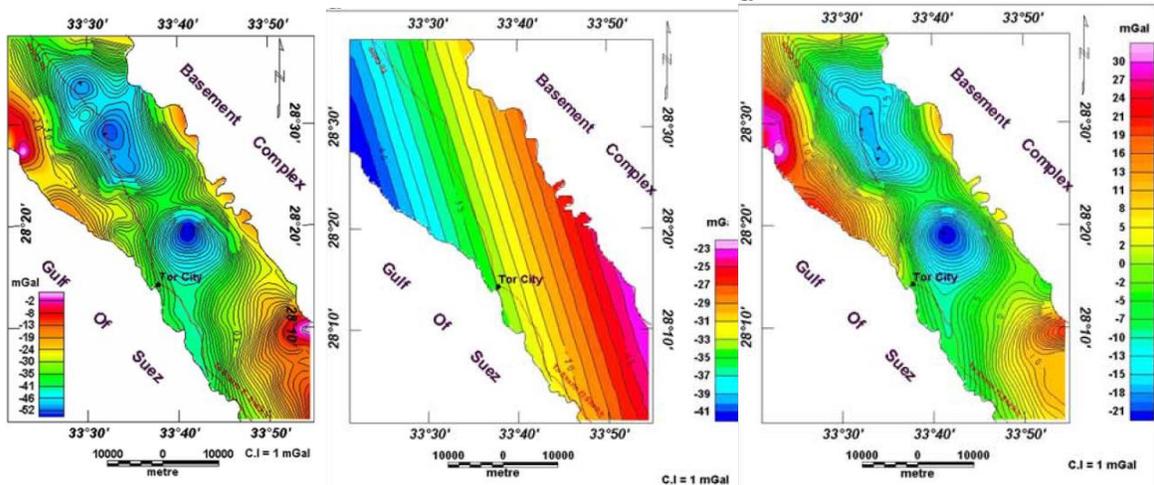
Mide la diferencia en la aceleración debida a la gravedad que se presenta entre una y otra estación en la superficie de la Tierra. La aceleración de la gravedad g se expresa en cm/seg^2 , Gales o Unidad de Gravedad (UG que es igual a 0.1 miligal), mili Gales o nano Gales dependiendo de la precisión del equipo de adquisición. Las diferencias en la aceleración son ocasionadas por: mareas terrestres (efectos del sol y de la luna); deriva del instrumento

(especialmente los equipos antiguos); latitud (la distancia entre el centro de la Tierra – Polos o Ecuador son diferentes); elevación topográfica; Aire Libre (disminución de la gravedad para estaciones ubicadas en altitudes más altas debido al aumento de la distancia al centro de gravitación; Bouguer (aumento de la gravedad para estaciones más altas debido a la atracción descendente adicional de una losa de roca entre el nivel de la estación y el nivel de referencia del área donde se realiza la investigación. Efecto de las condiciones topográficas que rodean al punto de medición (valles, cerros); variaciones laterales en la densidad de la roca. Todos los efectos anteriores deben de corregirse para obtener el valor de la anomalía gravimétrica (Anomalía de Bouguer).

El equipo de adquisición se llama gravímetro cuyo principio de operación se basa en la medición de la variación en la longitud de un resorte que compensa el peso de una masa pequeña. Los instrumentos actuales son de tipo electrónico.

El procedimiento de adquisición se basa en realizar observaciones equiespaciadas a lo largo de una línea o malla, para lo cual también es necesario realizar la nivelación topográfica. Para una descripción de mayor detalle sobre el principio de medición y correcciones se recomiendan los libros de Telford et al., 1990, Kearey y Brooks, 1991 y Milson, 2003, entre otros). La adquisición de datos de gravedad suele ser un proceso lento y, por lo tanto, costoso. Los resultados de los estudios de gravedad se presentan como mapas de gravedad y modelos 3D de manera similar a los de los datos magnéticos.

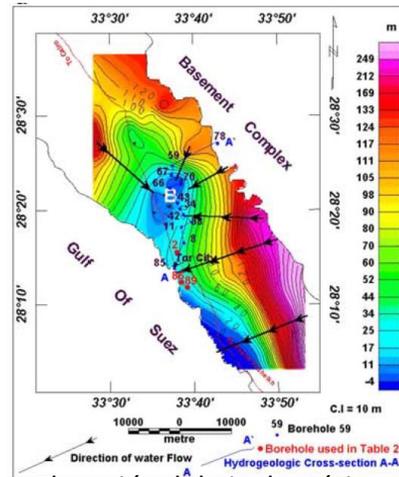
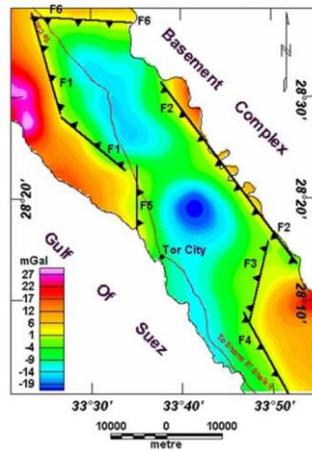
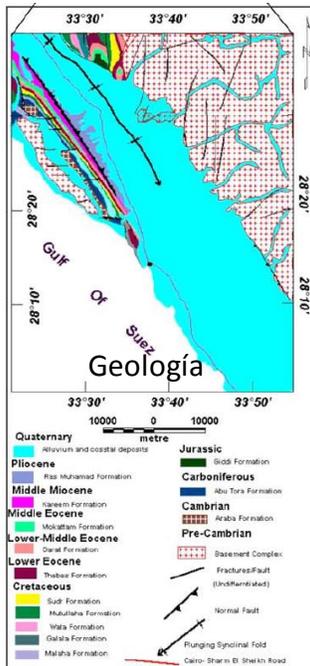
En la **Figura 4.32** se muestra un ejemplo de la aplicación de la gravimetría para la delimitación de estructuras en el subsuelo en un acuífero ubicado en Egipto.



Anomalía de Bouguer

Regional

Residual



Identificación de estructuras Elevación del nivel estático

Figura 4.32. Ejemplo de aplicación de la gravimetría en la hidrogeología, (Sultan, A.W., Ismail, M.M., Santos, F.M., 2009)

Sísmicos

Los métodos sísmicos se basan en la medición de la propagación de la energía elástica en un medio, generada por la explosión, impacto o vibración del terreno. La velocidad de la energía acústica en forma de ondas de compresión (P) y de corte (S), (conocidas también como ondas de cuerpo), están relacionadas con los módulos elásticos dinámicos: (incompresibilidad (Bulk), Corte, dilatación (Young) relación de Poisson y la densidad del material. Otro tipo de ondas de tipo superficial se presentan y se denominan como ondas Raleigh y Love. Para fines de investigación hidrogeológica la onda P es la que más se usa. Cabe mencionar también que la velocidad de la onda de compresión es siempre mayor que la de corte ($V_p > V_s$). La unidad de medida es m/s.

A la fecha, la mayor aplicación de los levantamientos sísmicos en la hidrogeología es a través del método sísmico de refracción, donde se usan las ondas de compresión que muestran una velocidad que se incrementa con la densidad. En cuanto a la sísmica de reflexión, casi no se ha usado. En México, se aplicó con fines de identificar las características del subsuelo del Valle de México a una profundidad de más de 3 000 m con el objeto de definir si las condiciones estructurales del subsuelo presentan condiciones para alojar un acuífero en rocas volcánicas (Pérez Cruz, G.A., 1986, COMESA, 2018)). Sobre este último tema, se tiene experiencia en rocas sedimentarias con fines de exploración de hidrocarburos; la experiencia en rocas volcánicas requiere de definir un arreglo de geófonos con base en las condiciones que presenta la distribución de las lavas, tobos y piroclastos, así como también la señal de excitación al terreno para identificar bien los reflejos de las diferentes capas que se presentan en el subsuelo. Para ello, es necesario diseñar una nueva forma de adquisición de datos y, sobre todo, el tipo de frecuencia que deben tener los vibradores para detectar las variaciones de contactos de las rocas y reducir el ruido ambiental generado en ciudades.

La velocidad V se calcula a partir del tiempo de viaje t de una onda en una distancia x , entre una fuente y un detector $v = x/t$. Las ondas elásticas que se propagan a través del subsuelo están sujetas a reflexiones y refracciones en las interfases presentes en los estratos rocosos que presentan diferentes propiedades físicas. Las señales sísmicas regresan a la superficie y se registran a través de matrices de sensores, geófonos (para trabajos en tierra) o hidrófonos (para trabajos en agua).

El equipo de medición se denomina sismógrafo y consiste en amplificadores y convertidores de señal de analógico-digital. Los cables conectan a los geófonos a un dispositivo de grabación, que es el sismógrafo. Los geófonos tienen un elemento magneto-dinámico, que convierte las vibraciones recogidas de la tierra en una pequeña corriente, que se transmite al sismógrafo. (Kovalevsky, V.S. et al, 2004). La señal se graba digitalmente en un dispositivo de almacenamiento magnético. Para el caso de la sísmica de reflexión se utilizan multicanales que permiten grabar simultáneamente en una red de distribución de detectores desde 12 a más de 256 detectores.

Las fuentes de generación de energía elástica pueden ser martillos, marros, pistolas, dinamita, vibradores e implosivos. Hay que tomar en consideración que el uso de explosivos requiere de un permiso especial para su obtención, manejo y uso. Cada tipo de energía genera un ancho de banda de frecuencia típico, el cual es de vital importancia determinar con base al tipo de litología que se encuentra en el subsuelo. (Kovalevsky, V.S. et al, 2004).

En cuanto al uso de este método en la hidrogeología, la presencia de agua en la roca afecta la velocidad de las rocas en función de su porosidad. En la **Figura 4.33** se muestra un ejemplo de un procesamiento de datos sísmicos con fines hidrogeológicos en un ambiente volcánico y sedimentario.

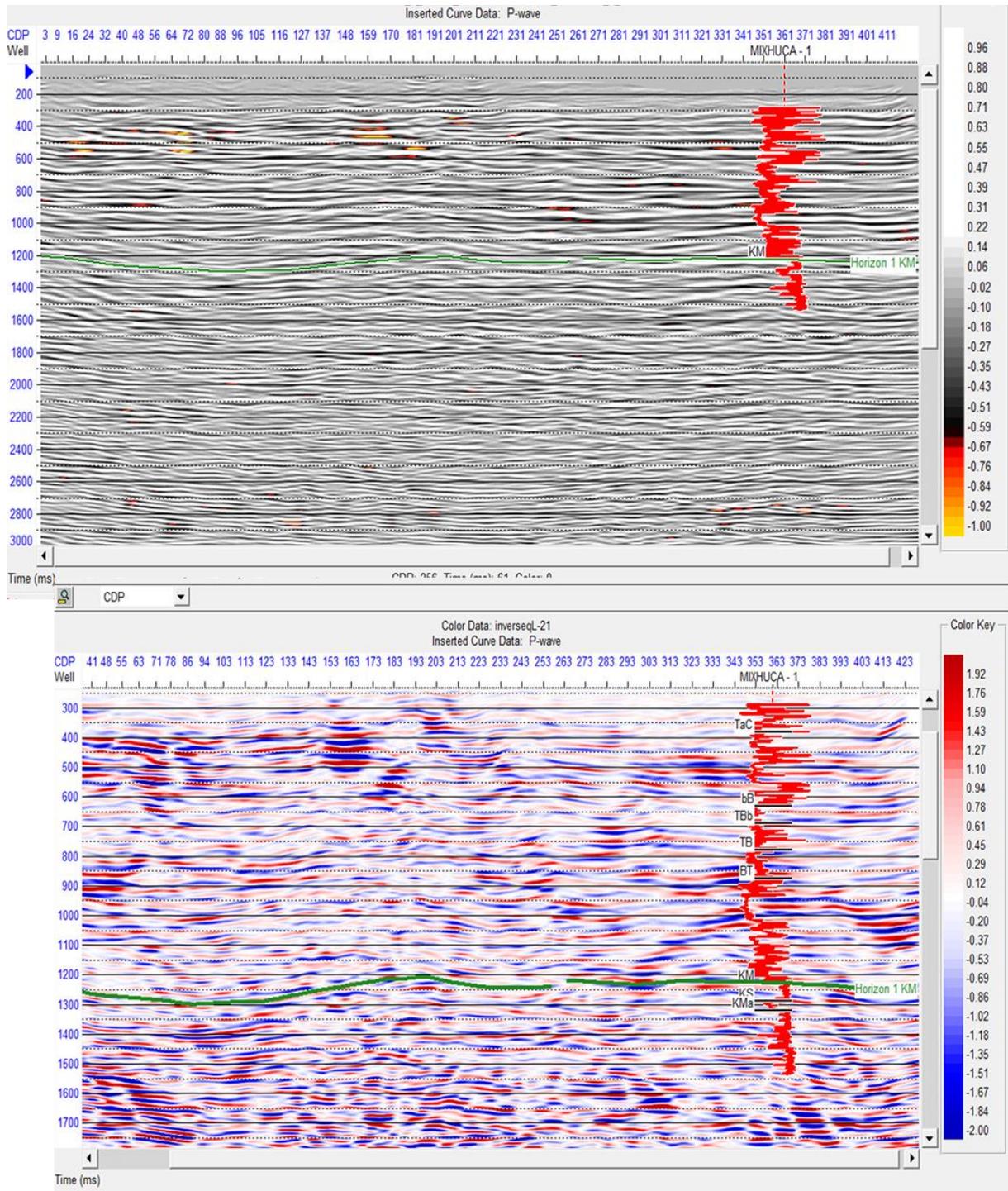


Figura 4.33. Ejemplo de procesamiento de datos sísmicos con fines hidrogeológicos

Polarización inducida

Es un método eléctrico que combina los efectos físicos de polarización inducida (PI) con los principios del método de resistividad, por lo que la adquisición de datos es similar, salvo que se requiere de un equipo más complejo. Si bien este método se desarrolló para la exploración minera, en el área de la hidrogeología se aplica en la identificación de materiales contaminantes de origen férrico o bien, derrames de hidrocarburos.

El efecto de PI se genera por efectos de membrana y por efectos de polarización del electrodo; ambos son procesos electroquímicos que son originados por la interacción entre los minerales de la roca y el comportamiento electrolítico del agua en los poros. Cuando la corriente fluye a través o a lo largo de los límites de los sólidos, el transporte de las cargas eléctricas se ve obstaculizado por procesos de reducción u oxidación, así como por diferentes movilidades de iones. Como resultado, las cargas eléctricas se acumularán localmente (polarización) y se difundirán, o se acumularán con un cierto tiempo de retraso en relación con la corriente de inducción. Una roca que contenga superficies de grano polarizables mostrará una relación de corriente/voltaje dependiente del tiempo, que también se puede presentar como una resistividad específica dependiente de la frecuencia combinada con un desplazamiento de fase similar a la capacidad.

El potencial de membrana es originado en una "nube iónica" en el agua de poro. Esta nube se mueve bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado. Algunos minerales, no metálicos, (arcillas) poseen una carga superficial negativa, que es neutralizada por iones positivos "libres" en el electrolito, formando así una "membrana" cargada eléctricamente, que consiste en "capas" alternas de cargas negativas-positivas. Cuando se aplica una corriente, la membrana neutra se interrumpe y cuando la corriente se apaga, se produce un movimiento de iones debido a las redistribuciones. (Kovalevsky, V.S. et al, 2004).

El movimiento iónico crea un flujo de corriente débil que se detecta en los electrodos de potencial. La polarización del electrodo se produce cuando las partículas minerales bloquean el flujo de iones, transportado por el electrolito. El flujo de corriente luego es transportado por electrones dentro de los granos minerales, lo que resulta en una acumulación de cargas eléctricas opuestas a la corriente en la interfase de partículas y electrolito (agua de poro). Cuando la corriente se apaga, la carga iónica no desaparece de inmediato, pero disminuye con el tiempo debido a la difusión de nuevo en el agua de poro. La polarización del electrodo es generalmente el efecto más fuerte y se genera particularmente por los minerales sulfídicos.

En cuanto a la polarización de membrana, esta se genera por partículas de arcilla y, por lo tanto, es útil en la exploración de aguas subterráneas. Cuando la resistividad y los métodos electromagnéticos (EM) no son capaces de diferenciar entre formaciones conductoras de arcilla y formaciones de agua subterránea, la PI puede indicar la presencia de arcilla.

El efecto PI se puede medir de tres formas (Kovalevsky, V.S. et al, 2004):

- Dominio de tiempo, la caída de la tensión IP se mide en "segmentos de tiempo" o "ventanas", que pueden ser de 4 a 12 y el tiempo de decaimiento es de 12 a 2 segundos.
- Dominio de frecuencia.
- Fase.

La propiedad física medida se llama la cargabilidad.

Para la adquisición de datos se ocupa principalmente un arreglo electródico dipolo-dipolo (ver inciso 4.2.1.2.), por lo que se requiere de electrodos de corriente y potencial colocados que puedan ser medidos con instrumento multielectródico. Para la medición de la PI se usa el mismo principio del TER; esto es, cuando el equipo inyecta corriente eléctrica en un par de electrodos de corriente se puede medir al mismo tiempo la resistividad, cuando el *Switch* se apaga se presenta un decaimiento de la diferencia de potencial, este efecto se denomina polarización inducida. El potencial observado en los electrodos de potencial es una curva de decaimiento logarítmica; la caída de potencial puede durar de milisegundos a unos pocos segundos. El nivel de este efecto y el periodo de descomposición dependen de las propiedades de la PI del medio que se mide. Es un método que demanda un gran tiempo en la adquisición de los datos aunado a que la medición debe realizarse en ambos sentidos con el propósito de centrar la anomalía. (Kovalevsky, V.S. et al, 2004).

Radar

Es un método que se usa para aplicaciones de poca profundidad de investigación (menores de 10 m).

Indica que el método puede ocupar ondas electromagnéticas de frecuencias entre 25 y 750 MHz, las cuales son transmitidas a partir de una antena. Cuando las ondas penetran a la Tierra se producen procesos de reflexión y refracción. La reflexión se lleva a cabo en la interface entre capas con propiedades eléctricas contrastantes. Las ondas recibidas en la antena receptora registran los tiempos de viaje (nanosegundos) y las amplitudes. El grado de reflexión está determinado por el contraste de las constantes dieléctricas de los materiales en ambos lados de la interface. (Kovalevsky, V.S. et al, 2004).

El coeficiente de atenuación se expresa en dB/m.

Magnetotelúrico, audio magnetotelúrico y audio magnetotelúrico de fuente controlada

El método magnetotelúrico (MT) fue desarrollado inicialmente para el estudio de cuencas sedimentarias de ambientes simples (Cagniard, 1953). En los años 80 se desarrollaron técnicas especializadas de medición, adquisición y procesamiento de los datos que permitieron tener una mejor resolución en ambientes geológicos complejos llegando a profundidades de investigación del orden de los 2 000 m; opera en el intervalo de frecuencias de 100 a 0.0001 Hz. Es un método de fuente natural en el dominio de la frecuencia

En tanto en el método audio magnetotelúrico (AMT) se basa en los mismos principios del MT, solo que opera en rangos de frecuencias más altos, de 1 a 10 000 Hz. También es un método de fuente natural.

Existe el método de fuente controlada CSAMT.

Las mediciones de los campos eléctrico y magnético se utilizan para determinar la resistividad eléctrica del subsuelo. La profundidad de penetración de los campos está directamente relacionada con este parámetro, es decir, que cuanto mayor sea la resistividad del subsuelo, mayor será la profundidad de los campos EM. Al mismo tiempo, la profundidad de penetración depende inversamente de la frecuencia.(Corbo C., F, 2006)

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica de exploración geofísica relacionada con el electromagnetismo que permite obtener información de las propiedades geoeléctricas del subsuelo mediante las fluctuaciones temporales del campo electromagnético natural generadas en la ionosfera, debido principalmente a la actividad solar. Se basa en la medición simultánea del campo electromagnético total, es decir, la variación de tiempo del campo magnético $B(t)$ y del campo eléctrico inducido $E(t)$. Las propiedades eléctricas (por ejemplo, la conductividad eléctrica) del material subyacente se pueden determinar a partir de la relación entre los componentes de las variaciones medidas del campo eléctrico (E) y magnético (B), o funciones de transferencia: Componentes de campo magnético horizontal eléctrico (E_x y E_y) y horizontal (B_x y B_y) y vertical (B_z). De acuerdo con la propiedad de las ondas electromagnéticas en los conductores, la penetración de las ondas electromagnéticas depende de la frecuencia de oscilación. La frecuencia del desarrollo de los campos electromagnéticos de la teoría determina la profundidad de penetración.

La conductividad eléctrica del suelo y la frecuencia son los responsables de la distribución de los campos ya que los medios conductores dificultan más la penetración que los medios resistivos. Además, como las frecuencias bajas se atenúan a mayor profundidad que las frecuencias altas, las medidas para diferentes frecuencias darán información de la distribución de resistividades en profundidad. Esta distribución es determinada por la relación entre las componentes de la variación del campo eléctrico y magnético medidos.

4.3. Calibración de la información adquirida

En la medida que sea posible, en cualquier exploración Hidrogeofísica es necesario contar con información, ya sea de un pozo (lo más conveniente) cercano al sitio donde se realizará el estudio o bien, una sección geológica o hidrogeológica esquemática de las posibles condiciones litológicas o posición del nivel estático del sitio, lo cual servirá para calibrar la información geofísica y dar un resultado acorde a la realidad. Para el caso de contaminación, una sección cercana al sitio donde se conozca que no hay influencia del contaminante, así como también, el conocimiento de las condiciones que presenta el suelo.

4.4. Georreferenciación

Este aspecto es de vital importancia en la exploración Hidrogeofísica, primero para ubicar con precisión el punto donde se realizó la medición. Hay que recordar que algunos estudios de gravimetría y magnetometría es fundamental tener georreferenciados los puntos donde se realizaron las mediciones. Para el caso de identificación de plumas de contaminación, zonas de taludes, también es necesario tener bien referenciado el sitio o líneas donde se realizaron las mediciones. En el caso del TEM en el inciso 4.2.3 (profundidad de investigación), se habla de la geometría de la bobina sobre las variaciones que puede tener la señal electromagnética,

de acuerdo con la forma y área de la bobina. Para el TER es necesario ubicar cada uno de los electrodos, ya que en la etapa de procesamiento es necesario hacer las correcciones a las ubicaciones para calcular el Factor Geométrico real y obtener un nuevo valor de resistividad aparente. El SEV es un caso similar, con la ubicación precisa de las aberturas AB/2 se puede calcular el valor de la resistividad aparente, con base en el Factor Geométrico real que será utilizada para determinar su valor verdadero.

En el siguiente ejemplo se puede observar el porqué es necesario georreferenciar los puntos de medición, para los casos de TER y SEV, **Figura 4.34**. Las dos líneas tienen la misma longitud; la línea sinuosa aparentemente es más corta por las variaciones en la elevación topográfica; sin embargo, tiene la misma extensión de cable en el terreno, lo cual modifica el valor del Factor Geométrico del arreglo eléctrico que se esté utilizando.

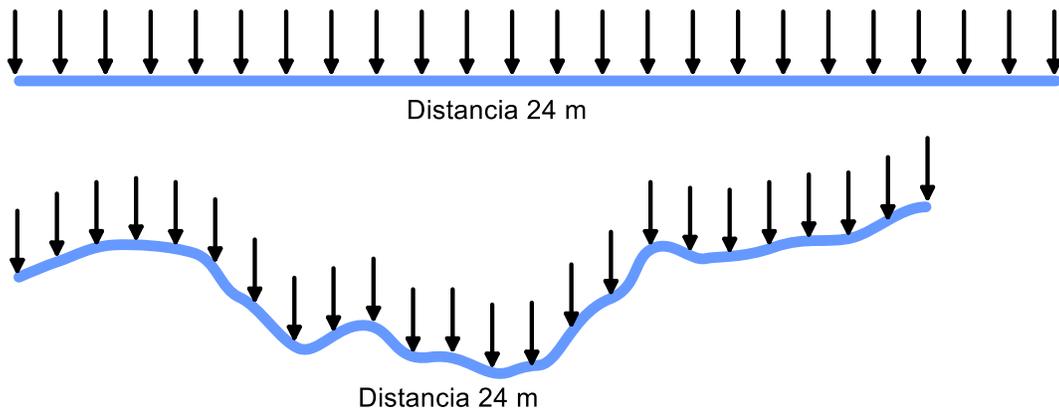


Figura 4.34. Ejemplo de las variaciones en posición que se presentan generalmente en campo (terreno plano o terreno sinuoso)

4.5. Tipos de formatos para guardar los datos o señales adquiridos

Como última etapa del proceso de adquisición es necesario comprobar que los datos registrados sean de buena calidad y no hayan sufrido alteraciones por una mala colocación de los electrodos o bobina, o por reacciones inherentes al contacto de los electrodos con el terreno, o que la bobina quede por encima del suelo en algunos sitios.

Una vez comprobado que la calidad de los datos es buena se procederá a guardar la señal en el formato que dé el equipo de adquisición o bien, adaptarlo para el tipo de software con que se cuenta para realizar el procesamiento de los datos.

En la **Tabla 4.4** se presentan los diferentes tipos de formatos que se pueden generar con base en el equipo de adquisición o bien, al tipo de formato que leen los diferentes softwares.

Tabla 4.4. Tipos de formatos que se pueden generar de los equipos de adquisición de datos

Formato Equipo de medición	SEV	TER	TEM
*.xls	X	X	X
*.txt	X	X	X
*.csv	X	X	
*.dat	X	X	X
*.2dm	X	X	X
*.sir			X
*.bin			X
*.tem			X
*.usf			X
*.xyz			X

Capítulo V. Procesamiento

5.1. Metodología del procesamiento

De igual forma que en capítulo anterior sólo se considerarán las técnicas de SEV, TER y TEM.

El proceso de procesamiento de datos se plantea en la **Figura 5.1**.

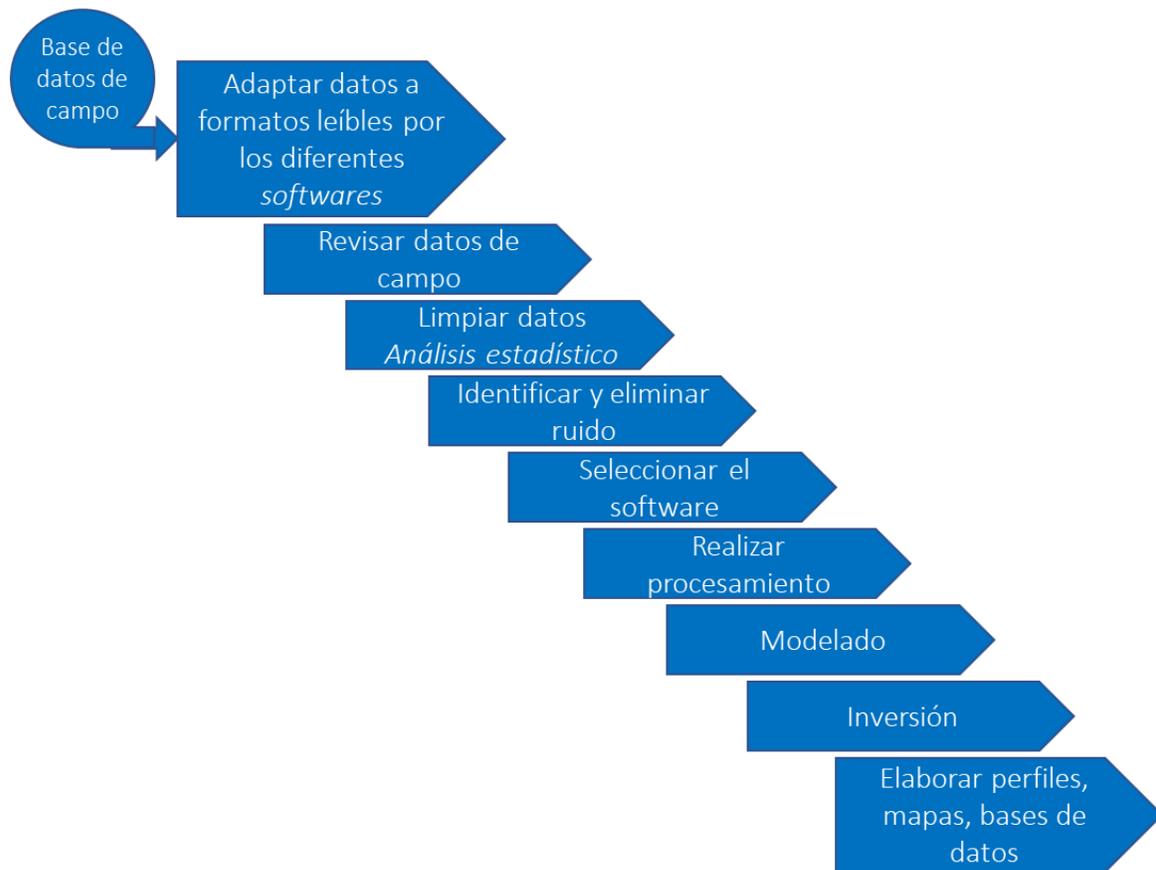


Figura 5.1. Proceso de procesamiento de datos de la Hidrogeofísica

5.2. Software para Hidrogeofísica

Existe una gran variedad de softwares para realizar el procesamiento de datos, algunos son específicos del equipo de adquisición, otros son de patente y otros desarrollados por los demandantes de un programa de cómputo que les apoye a resolver su problema en particular, dependiendo de la técnica geofísica empleada.

A continuación, se presenta una relación de programas de cómputo que son los más utilizados en México. **Tabla 5.1**

Tabla 5.1. Software más usado en México por método

Métodos eléctricos (SEV)		
	Desarrollador	Página web
Resixplus	Interpex (desuso)	
IX1D	Interpex	www.interpex.com
ZondIP1d	Zond software	www.zond-geo.ru
AGI EarthImager™ 1D	Advanced Geosciences, Inc.	https://www.agiusa.com
IPI2win		http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm

Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER)		
	Desarrollador	Página web
AGI EarthImager™ 2D	Advanced Geosciences, Inc.	https://www.agiusa.com
RES2DINV (2 dimensiones)	Geotomo Software	https://www.geotomosoft.com
RES3DINV (3 dimensiones)	Geotomo Software	https://www.geotomosoft.com

Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM)		
	Desarrollador	Página web
TerraWare	GEOTEM Ingeniería	Terraware.geo@gmail.com
Temix	Interpex (desuso)	
WinGLink	Schlumberger	https://www.slb.com/services/seismic/seismic-reservoir-characterization/electromagnetics/emsoftware/winglink.aspx
JoinTem	University of Oulu, Finland	http://www.oulu.fi
ZondTEM1D	Rusia	http://www.zond-geo.com

5.3. Procesamiento de datos

Los datos de la Hidrogeofísica se procesan normalmente eliminando o filtrando los datos influenciados por el ruido. Algunas veces se realiza en forma:

- Manual,
- Análisis espectral (análisis de Fourier, muestreo y espectro en el dominio del tiempo y espacio),
- Forma de onda (convolución, deconvolución, correlación o filtrado digital),
- Análisis de señales (mínimos cuadrados y filtros digitales),

diseñados ex profeso para abordar los numerosos desafíos que presentan las señales obtenidas por los diferentes métodos de la Hidrogeofísica.

El análisis puede ser desde la calibración y normalización de los datos hasta la identificación y eliminación de los diferentes ruidos que la afectan (por ejemplo: ruido cultural, geometría del arreglo de adquisición, topografía, limitaciones del equipo de medición, y otros más dependiendo el método), con el propósito de tener una señal mejorada que esté acorde a las condiciones físicas del medio.

Para el caso de la Hidrogeofísica hay que tener en mente el tipo de señal que se obtiene, si es continua o estocástica. Para el caso que se trata en este trabajo, la señal que se trata es de tipo estocástico; es decir, se obtiene una señal que es producto de la unión de varias mediciones que se agrupan en ventanas de tiempo, o en una posición determinada; generalmente son pocas mediciones como es el caso del método SEV, TER o TEM, que se obtiene de forma puntual y cada medición representa una posición en el tiempo o en la distancia (separación de electrodos o ventanas); puede considerarse también en esta situación la gravimetría y magnetometría; en el caso de la sísmica, magnetotélurico y radar, al ser una señal continua y variante en el tiempo, se aplica otro procedimiento a la señal (análisis de Fourier) el cual no será tratado en este trabajo.

Para el caso de la información obtenida en los métodos SEV, TER y TEM, como primer paso es conveniente realizar un análisis estadístico de los datos, para conocer su comportamiento medio y sus variaciones (desviación estándar). Asimismo, es necesario, para el caso del TEM analizar la señal de ruido que se mide en el sitio donde se realizó la medición. Hay que tener en mente que cada proceso que se realice a los datos debe ser seleccionado cuidadosamente para que coincida con los objetivos de la investigación que se realiza. Cada paso afectará la calidad de las imágenes, mapas o perfiles finales y, en última instancia, su confianza en los resultados.

El procesamiento y la visualización organizada de los parámetros de la Hidrogeofísica son componentes esenciales de la interpretación y elaboración de informes. El procesamiento y la visualización de los datos son inseparables los cuales siguen una lógica que implica la: (Kovalevsky, V.S. et al, 2004)

- Recopilación y análisis de datos.
- Validación y almacenamiento de datos.
- Recuperación de datos (interpolación) para procesamiento.
- Filtrado para suavizar o realzar la señal.

5.3.1. Análisis estadístico

En este punto se incluye una variedad de análisis a los datos, entre otros, media, mediana, desviación estándar, error estándar, regresión análisis de varianza y correlación; en algunas situaciones se pueden realizar probabilidades. Hoy en día se hace también uso de la geoestadística. Existe un mundo de información y libros sobre este tema (Walpole, R.E., et al, 2012, Spiegel, M.R. y Stephens, L.J.,2009, Kovalevsky, V.S. et al, 2004).

Otra situación que también se presenta en el tipo de señales que se adquieren es que pueden ser dependientes del tiempo. Estos datos son analizados por métodos de series de tiempo como el análisis de tendencias y los métodos de correlación o regresión polinómica.

El análisis multivariable es otra herramienta que es de utilidad, aunque se usa como una herramienta predictiva en la hidrogeología, es un análisis de regresión lineal múltiple.

Para el caso del TEM donde cada ventana de medición es independiente y al unirse representan una señal del comportamiento de las condiciones del subsuelo, también puede realizarse un análisis estadístico por ventana (siempre y cuando se realicen varias mediciones) como se presenta en la Figura 4.24.

5.3.2. Modelo directo y modelo inverso

Un modelo es una versión simple y pequeña de algo real, pero en la terminología geofísica es un cuerpo o estructura descrita por sus propiedades físicas, tales como profundidad, tamaño, valor, distribución. Encontrar la forma de un cuerpo a partir de una anomalía se conoce como el problema inverso. En la práctica es difícil de resolver y hasta casi imposible, porque más de un cuerpo puede producir el mismo resultado. También, por causa del ruido y los errores de medición, puede ser difícil discernir la exacta forma y tamaño de la anomalía. Las estaciones pueden no estar lo suficientemente cerca como para revelar todos los detalles de la forma del cuerpo. A veces, es posible deducir el cuerpo directamente desde los resultados ya sea a través del modelado inverso o interpretación directa. Más aún, con el apoyo de una computadora es más fácil proponer un modelo, calcular los valores anómalos que produciría y compararlos con los medidos. Luego modificarlos hasta que el ajuste de curvas (campo – modelo) sea suficientemente bueno. Este método iterativo de prueba y error es llamado modelado inverso. Aún con modernas computadoras, este proceso puede consumir mucho tiempo, por lo que es conveniente construir modelos simples con secciones constantes conocidas como modelos 2D. Si no hay claridad respecto a la forma del cuerpo, se utiliza el modelado en 3D. Un modelo generalmente tiene una forma simple, límites bien definidos y propiedades físicas uniformes, mientras que el cuerpo tiene forma irregular, límites graduales y propiedades que varían espacialmente. (Mussett, A.E., Khan, M.A., 2000, Kearey, P., Brooks, M., Hill, I.2002).

En la **Figura 5.2** se muestra un esquema real del problema inverso en donde dado un modelo **m**, la física del problema determina los datos a predecir **d**; esto se llama el problema directo. Para un conjunto de datos dado, se puede determinar un modelo estimado \hat{m} , conocido como problema de estimación de modelo donde se le agrega un elemento de incertidumbre al dato. (Scales, J. A. y Snieder, R. 2000).

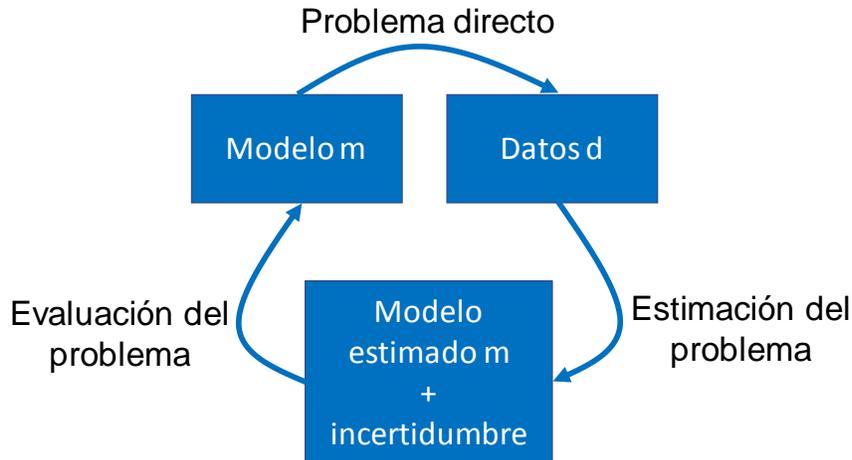


Figura 5.2. Otro punto de vista de los problemas inversos (tomado de Scales, J. A. y Snieder, R. 2000)

Con base en lo anterior (Zúñiga L., R, 2015), considera que el estudio de la Tierra se puede considerar como un sistema físico, cuyas propiedades pueden dividirse en tres etapas.

A. Parametrización del sistema: obtener un conjunto mínimo de parámetros que lo caractericen completamente, desde un determinado punto de vista.

B. Modelado directo: conocer los parámetros del modelo m , se calculan los valores de dichos parámetros de un modelo conocido d . Respuesta $d = f(m)$. Para los valores dados de los parámetros del modelo, se pueden hacer predicciones sobre los resultados de las mediciones de acuerdo con algunos parámetros observables.

C. Modelado Inverso: utilizar resultados reales de algunas mediciones de parámetros observables, es decir la respuesta, d , para inferir los valores reales de los parámetros del modelo m . Parámetros $m = F(d)$. Hay que mencionar que para llevar a cabo este procesamiento es necesario que el medio sea isótropo y estratificado, **Figura 5.3.**

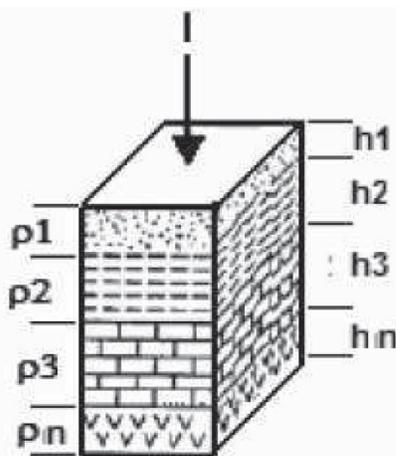


Figura 5.3. Condiciones para realizar la modelación directa e inversa

Con base en estas etapas, en este trabajo se plantea el procesamiento de datos que debe aplicarse a los SEV, TER y TEM.

Aun cuando los resultados de una medición hayan sido reducidos y graficados, las características de interés pueden no ser obvias. Si es así, será necesario un procesamiento que permita mejorar las características buscadas. Existen varios procedimientos para el procesamiento de datos geofísicos **Tabla 5.2**.

Tabla 5.2 Tipo de Procesamiento que se realizan a las señales geofísicas

Análisis de Fourier	Filtrado Digital
• Longitud de onda (Ecuaciones para el análisis armónico de Fourier)	• Filtros simples
• Análisis armónico	• Alisado
• Análisis de Fourier de un perfil	• Filtro simple
• Análisis de Fourier en dos dimensiones	• Filtrado en 2d

Para el caso que nos ocupa sólo se tratará en este trabajo la parte correspondiente al filtrado digital.

Es común considerar a las ondas de interés geofísico compuestas de señal y ruido. La señal es la parte de la onda que informa sobre las estructuras geológicas a investigar; en tanto, el ruido es todo lo demás, y puede ser dividido en dos componentes: cultural y coherente. El ruido cultural presenta un comportamiento estadístico y generalmente es originado por causas desconocidas. El ruido coherente es una componente de la onda que genera el propio experimento geofísico. Ninguno de estos es de interés en la interpretación Hidrogeofísica; sin embargo, se convive con él y afecta a la señal natural.

En circunstancias favorables la relación señal-ruido (RSR) es alta, de modo que la señal es fácilmente identificable y extraíble para su análisis. Generalmente la RSR es baja por lo que se necesita un proceso especial que mejore la información contenida en la onda y elimine todos los ruidos. **El ruido cultural se puede eliminar promediando mediciones repetidas.**

El ruido coherente debe ser filtrado, es decir que primero deben identificarse sus características y luego diseñarse el filtro correspondiente, pero la señal remanente puede quedar distorsionada si el filtro no es el adecuado. El filtrado digital se utiliza ampliamente en el procesamiento de datos geofísicos, para mejorar la RSR y por lo tanto la calidad de la señal.

Existe una gran variedad de filtros digitales para uso geofísico y muy especialmente para sísmica de reflexión (Robinson y Traite 2000), como filtros digitales de frecuencia y los inversos (deconvolución).

Uno de los filtros digitales más simples toma el promedio de tres lecturas sucesivas que consiste en obtener un valor que puede ser el promedio de tres lecturas consecutivas $\frac{x_1+x_2+x_3}{3}$ o bien en darle un mayor peso al punto central de los datos $\frac{x_1+2x_2+x_3}{3}$. otro más es el conocido como *Moving Average* en donde al punto central se le da un mayor peso.

El procesamiento de señales no sustituye al cuidadoso diseño de una medición, ni optimiza la calidad de los datos que puedan ser adquiridos con el adecuado esfuerzo y costo, pero puede ser útil para extraer más información de los datos mejorados y es ampliamente usado en las mediciones geofísicas

5.3.3. Procesamiento de datos del SEV

Para el procesamiento de los datos con esta técnica se deben realizar las siguientes actividades:

1. Verificar que los datos de campo sean correctos.
2. Capturar los datos de campo en una hoja de cálculo donde se coloque la coordenada del centro del sondeo y las coordenadas de las aberturas AB/2 y MN; corriente y voltaje.
3. Recalcular el valor de la resistividad con base en el nuevo valor de Factor Geométrico, y realizar las correcciones por topografía y elevación.

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}$$

4. Sobreponer las curvas de resistividad, tomando la primera curva como fija y desplazar la segunda, u otras que se obtengan, con base en el incremento del valor de la abertura MN. **Figura 5.3.**

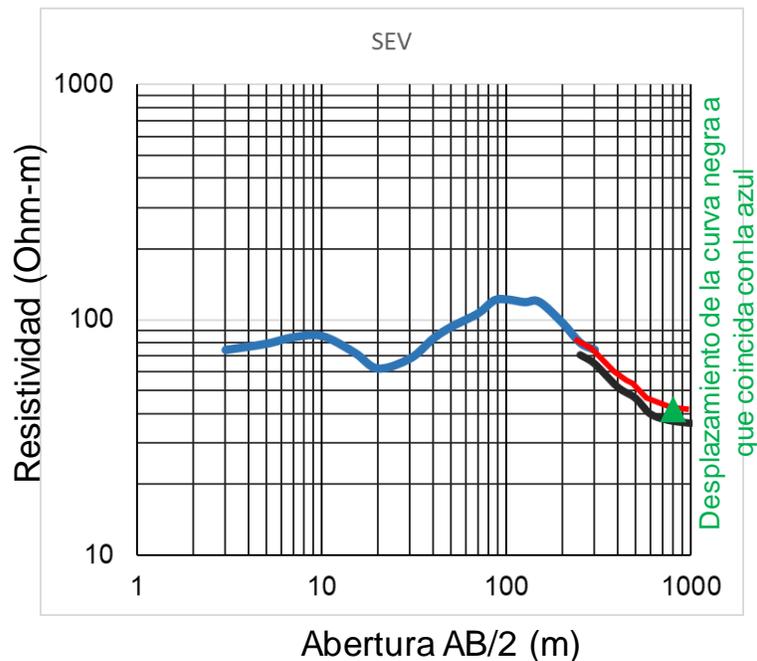


Figura 5.3. Forma en cómo se pueden presentar los datos del SEV cuando se cambia la abertura MN

5. Dependiendo de la forma en que se presente la curva, y una vez hecha la sobreposición de las curvas, si fuese el caso, se puede aplicar un filtro lineal a los datos para suavizar problemas que se hayan generado por la topografía o posición de los electrodos.
6. Dependiendo el número de sondeos realizados, construir mapas o perfiles de resistividad aparente.
 - a. Para el caso de los mapas, estos permitirán ver la variación de la resistividad en planta a diferentes aberturas $AB/2$, deben ser los suficientes y estar distribuidos en el área de estudio. Los mapas por realizar serán con base en las aberturas que se hayan realizado y en aquellas aberturas que presenten más variaciones o sean las más representativas de objetivo de la exploración.
 - b. Para el caso de perfiles de isoresistividad, dependiendo el número de secciones que se haya programado, se elaborarán de tal forma que la sección se vea de W-a E y de S a N. Las curvas que se presenten serán con base al arreglo eléctrico que se diseñó. En esta situación pueden presentarse las gráficas de los SEVs en escala normal, siendo el eje X el valor de resistividad y -Y la escala vertical, **Figura 5.4**.

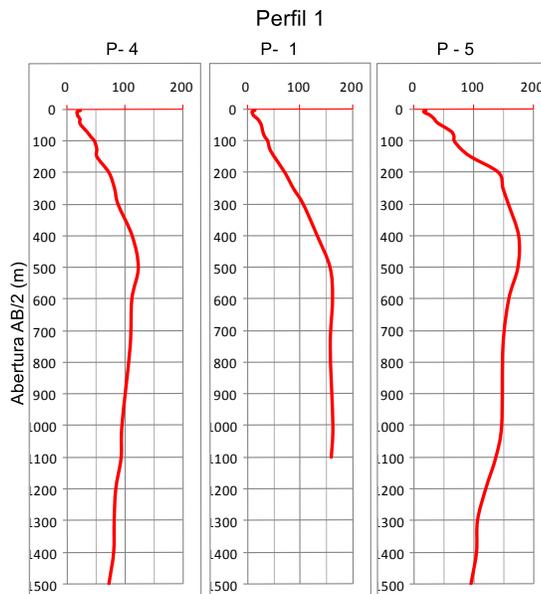


Figura 5.4. Perfil de resistividad aparente

O bien, en una sección de isoresistividades aparentes. **Figura 5.5**

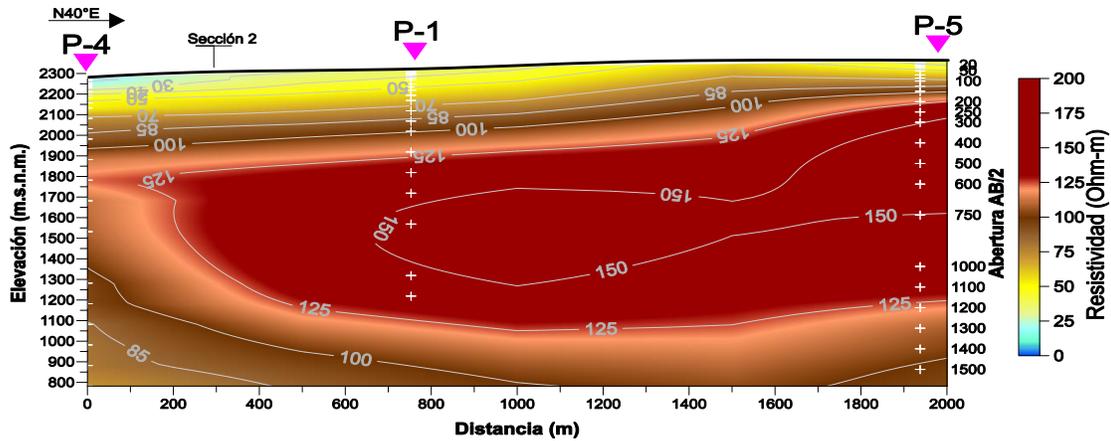


Figura 5.5. Ejemplo de una sección de iso-resistividades aparentes

- c. Tanto los mapas como los perfiles, **Figura 5.6**, se pueden representar en escala de colores. Para este caso considerar colores azules para las zonas de baja resistividad o alta conductividad y rojos para las zonas con alta resistividad o baja conductividad.

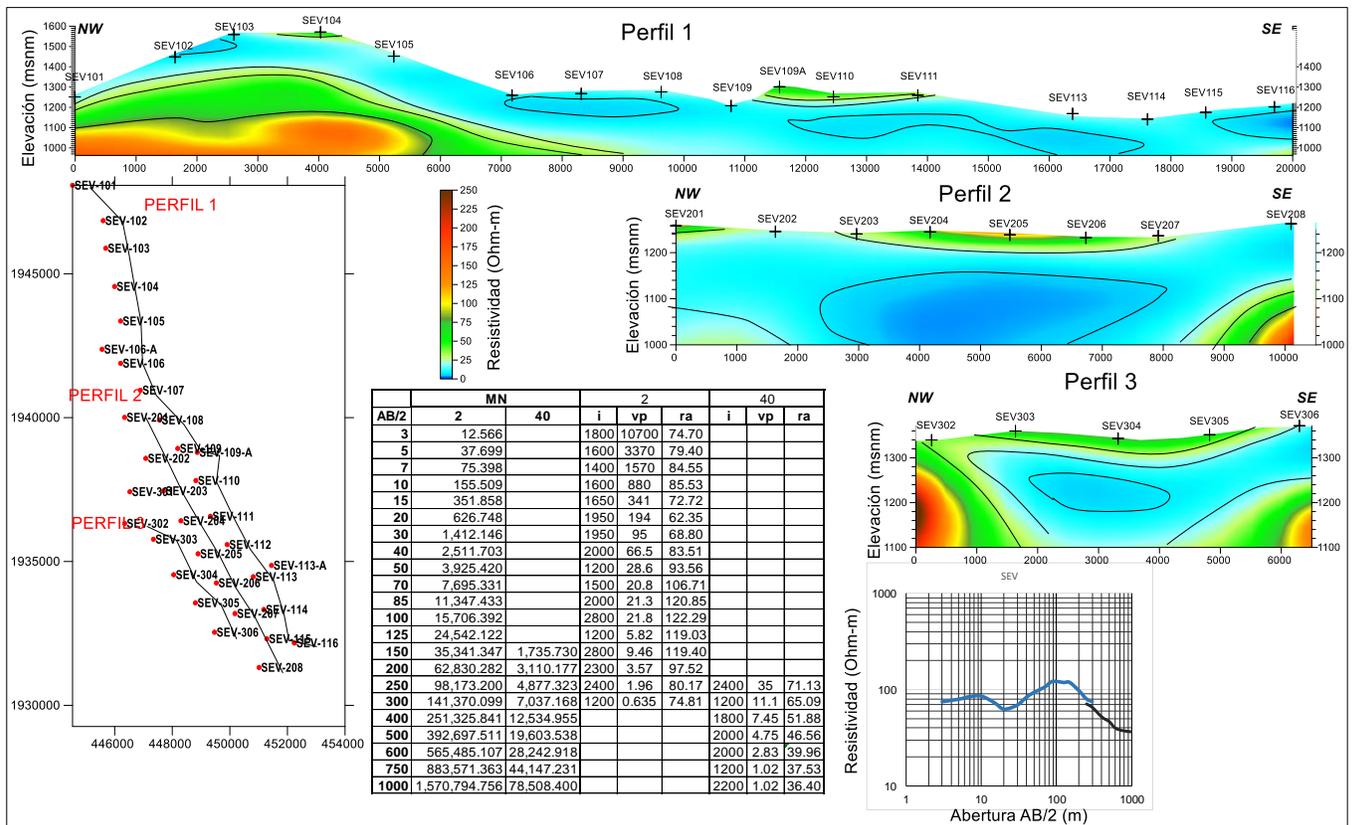


Figura 5.6. Ejemplo de presentación de resultados de campo y cálculo del valor de resistividad

7. El objetivo del SEV es la obtención de los valores de resistividad a cierta profundidad de las capas que se identifiquen en el subsuelo, con el objeto de conformar un modelo geoelectrico individual o bien, un perfil geoelectrico (modelado).

Con base en lo anterior el modelo directo de resistividad 1D resuelve la ecuación diferencial parcial. Koefoed (1979) presentó la teoría del problema inverso a partir del problema directo, que permite determinar el comportamiento del potencial eléctrico en un medio que se asume constituido por capas limitadas por superficies planas y paralelas a la superficie. Este método considera una fuente de corriente puntual en la superficie de un medio estratificado con capas homogéneas e isotrópicas, con espesores de capa h y resistividades ρ . (Montaño Mejía, F.H., Vega Vega, P.A. 2009). La expresión para el potencial en términos de corriente, distancias entre electrodos y parámetros del subsuelo se soluciona a partir de la ecuación de Laplace; en coordenadas cilíndricas se expresa como

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} = 0$$

Como se asume isotropía en cada capa, no habrá dependencia angular, por lo tanto, sólo subsisten los primeros tres términos y la solución de la ecuación se puede hacer por separación de variables:

$$V(r,z) = U(r) W(z)$$

Las soluciones para U y W son

$$W = C e^{\mp \lambda z} \quad U = C J_0(\lambda r)$$

Donde C y λ son constantes arbitrarias y J_0 es la función Bessel de orden cero. De modo que la solución general, suponiendo que C varía en dependencia de λ , será:

$$V = \int_0^\infty [\phi(\lambda) e^{-\lambda z} + \psi(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

Que con algunas consideraciones se puede expresar como:

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^\infty [1 + 2\theta_1(\lambda)] J_0(\lambda r) d\lambda$$

8. Para identificar las propiedades de las capas con diferentes resistividades se hace uso de software especializado. (Inversión) (Ver tabla 5.1).
9. Una vez obtenida la información se debe calibrar con información real del subsuelo que se tenga del área de estudio (pozo -posición del nivel del agua, profundidad total-, corte litológico, geología superficial, sección geológica esquemática).
10. Generalmente el software proporciona un error cuadrático RMS que permite ver que tan acoplados están los valores de campo con los valores obtenido de la inversión; se considera que mientras más bajo sea este error mejor será nuestro resultado; sin embargo, hay que recordar que el resultado obtenido es producto de los cuerpos inmersos que se encuentran en el subsuelo, situación que físicamente no se ve, a menos que se

realice la exploración directa para validar el dato. Una manera de validar el valor de RMS es la conceptualización que se tenga del sitio donde se realizó la medición.

- Los resultados pueden ser una sección geoelectrica cuando se presentan varios sondeos en una línea, **Figura 5.7**, o un modelo geoelectrico individual por SEV, **Figura 5.8**.

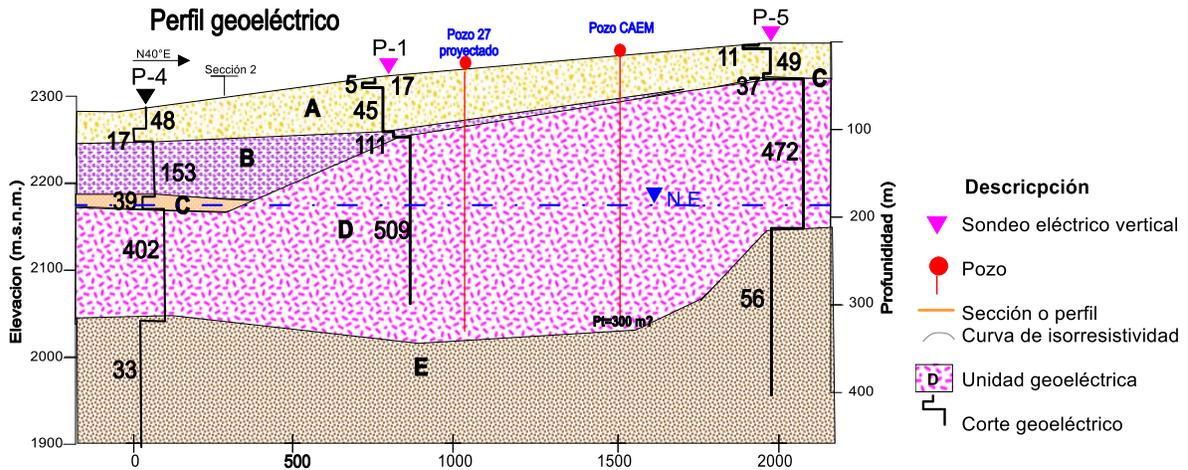


Figura 5.7. Perfil geoelectrico

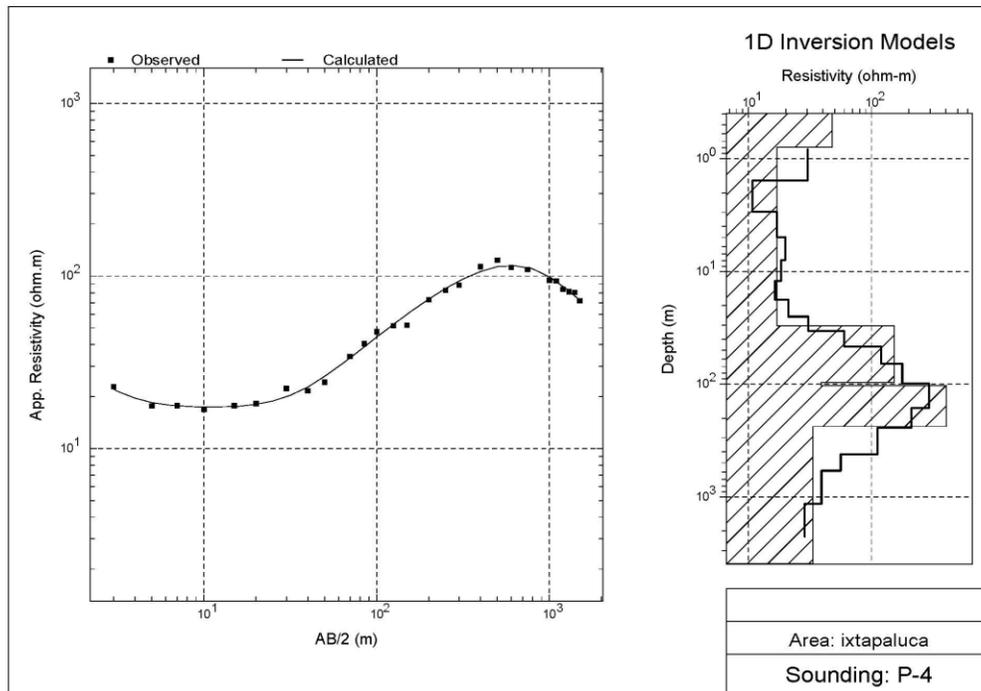


Figura 5.8. Modelo geoelectrico obtenido a partir del procesamiento con el programa Resixplus. El SEV corresponde al P-4 de la figura anterior

5.3.4. Procesamiento de datos del TER

Para el procesamiento de los datos con esta técnica se deben realizar las siguientes actividades:

1. Transferencia de los registros de datos de campos del equipo de adquisición a la computadora.
2. Convertir los archivos que genera el equipo de adquisición de datos a un formato que pueda revisar, corregir y realizar el procesamiento de los datos; por ejemplo, el equipo ARES genera un archivo *.2dm (puede leerse en Excel o como block de notas).
3. Adaptar los datos para que el programa de procesamiento pueda leerlos.

Algunos equipos proporcionan la posición de los electrodos C1, C2, P1, P2 y los datos que se midieron. **Figura 5.9.**

C1 [el]	C2 [el]	P1 [el]	P2 [el]	Aray	I [mA]	V [mV]	EP [mV]	AppRes [Ohmm]	St-dev [%]
0	3	1	2	WS	124.79	29.91	41	7.53	0
1	4	2	3	WS	178.44	43.73	-78	7.7	7.8
2	5	3	4	WS	238.85	60.15	-123.1	7.91	9.9
3	6	4	5	WS	366.92	99.84	-39.22	8.55	0.7
4	7	5	6	WS	284.57	83.07	-74.75	9.17	0.9
5	8	6	7	WS	234.82	67.32	-35.03	9.01	0.7
6	9	7	8	WS	285.63	96.67	-91.41	10.63	7.6
7	10	8	9	WS	220.19	76.48	-37.82	10.91	0.5
8	11	9	10	WS	219.9	73.82	-78.81	10.55	1.3
9	12	10	11	WS	183.52	71.02	-50.78	12.16	1.2
10	13	11	12	WS	179.51	63.59	-109.45	11.13	2.4
11	14	12	13	WS	169.82	53.25	20.2	9.85	0.8
12	15	13	14	WS	127.58	50.74	-15.82	12.49	0.9
13	16	14	15	WS	157.98	60.81	-73.98	12.09	1.5
14	17	15	16	WS	136.94	55.22	-14.09	12.67	1.1

Figura 5.9. Forma de adquisición de los datos por renglón, horizontal

A(C1)	B(C2)	M(P1)	N(P2)	Iteration	K	V(mV)	I(mA)	R0	SP
1	4	2	3	4	31.415899	194.02803	580.579407	10.499142	68.933617
5	8	6	7	4	31.415899	193.790283	511.021027	11.9135	46.774559
9	12	10	11	4	31.415899	199.622147	520.116455	12.05724	26.674614
13	16	14	15	4	31.415899	190.505478	387.326965	15.451667	-58.91663
17	20	18	19	4	31.415899	305.776917	703.176819	13.660997	162.477859
21	24	22	23	4	31.415899	227.541092	583.659546	12.247622	-39.372723
25	28	26	27	4	31.415899	308.905914	556.246033	17.446016	-3.743384
29	32	30	31	4	31.415899	323.749542	657.519531	15.468552	-39.322254
33	36	34	35	4	31.415899	262.658722	593.492554	13.903598	-42.625404
37	40	38	39	4	31.415899	193.844498	523.213623	11.638523	15.274327
41	44	42	43	4	31.415899	211.119247	684.983765	9.681794	59.93927
45	48	46	47	4	31.415899	173.137726	572.911621	9.49401	-54.597282
2	5	3	4	4	31.415899	177.935471	643.323975	8.68926	-406.054016
6	9	7	8	4	31.415899	205.284531	516.221558	12.492947	-418.27243
10	13	11	12	4	31.415899	171.856094	413.635468	13.052363	-3.818599
14	17	15	16	4	31.415899	241.938843	536.933838	14.155641	-13.672296
18	21	19	20	4	31.415899	200.573822	558.424133	11.28368	-176.323563
22	25	23	24	4	31.415899	264.61377	605.234802	13.735131	-414.258026
26	29	27	28	4	31.415899	201.101974	475.52063	13.285846	-91.16761
30	33	31	32	4	31.415899	232.563538	595.367737	12.271877	43.017319
34	37	35	36	4	31.415899	144.155212	453.994934	9.974908	-143.513687
38	41	39	40	4	31.415899	160.219131	502.965302	10.007514	-148.591751
42	45	43	44	4	31.415899	186.778793	654.965515	8.958605	2.267175

Figura 5.11. Forma de adquisición de los datos de TER en forma inclinada

4. Recalcular los valores de Factor Geométrico con base en la ubicación real de la línea.
5. Cada electrodo debe ser georreferenciado (X,Y,Z).
6. Determinar la posición correcta de los electrodos tanto en el perfil como a profundidad. En este punto hay que calcular las posiciones horizontales de los electrodos y el nivel de medición vertical. Para ello se deben realizar los siguientes cálculos (arreglo Wenner-Schlumberger):
 - $x = P1 + (P2-P1)/2$
 - $n = (P1-C1)/(P2-P1)$
donde C1 y C2 son los electrodos de corriente y P1 y P2 son los electrodos de voltaje.

7. Ajustar la matriz de datos por niveles de medición

X1, 1	X2, 1	X3, 1	...	Xn-2, 1	Xn-1, 1	Xn, 1
X1, 2	X2, 2	X3, 2	...	Xn-2, 2	Xn-1, 2	Xn, 2
X1, 3	X2, 3	X3, 3	...	Xn-2, 3	Xn-1, 3	Xn, 3
...
X1, n	X2, n	X3, n	...	Xn-2, n	Xn-1, n	Xn, n

Hay que mencionar que la matriz tiene la forma de un triángulo o trapezoide invertido, **Figura 5.12**. Cada nivel inferior tendrá menos datos, hasta poder llegar a uno.



Figura 5.12. Forma en que se pueden presentar los resultados del TER

8. Aplicar un filtro para mejorar la señal, por nivel (renglón). Puede ser *Moving Average*, promedio, o los desarrollados por Tejero A., A. (2019).
9. Colocar los datos del encabezado para que pueda ser leído por el software, **Figura 5.13**.

nr-ter-1a				
3				
7				
529				
0				
0				
3	3	1	71.954	
6	3	1	48.735	
9	3	1	68.329	
12	3	1	64.385	
15	3	1	74.247	
18	3	1	69.562	
21	3	1	68.261	
24	3	1	59.421	
27	3	1	58.135	
30	3	1	70.154	
33	3	1	48.248	
36	3	1	62.27	
39	3	1	51.778	
42	3	1	48.496	
45	3	1	48.107	
48	3	1	53.363	
51	3	1	46.524	

Figura 5.13. Forma de organizar los datos para ser introducidos a los softwares de procesamiento (puede variar de acuerdo con el software elegido)

10. El objetivo del TER es la obtención de la distribución lateral como a profundidad de los valores de resistividad de las capas o cuerpos que se identifiquen en el subsuelo, con el objeto de conformar un modelo geoelectrico (modelado directo – inversión).

En cuanto al problema directo, se obtiene el potencial en la superficie cuando se conoce la distribución de la resistividad en el subsuelo. Obtiene soluciones analíticas exactas y aproximadas en superficie cuando se consideran cuerpos de formas diversas en el subsuelo, con el propósito de obtener el efecto que ejercerían estos cuerpos de forma, dimensiones y propiedades específicas sobre un sensor instalado sobre la superficie del terreno. En tanto, en el problema inverso es una metodología empleada para extraer información útil del medio físico empleando datos en forma numérica de alguna propiedad de este entorno. Estas propiedades también se referirán como método específico (normalmente una teoría matemática o modelo) que relaciona los parámetros con los datos. El problema inverso contrasta con el problema directo, donde se predicen los datos a partir de los parámetros y de un modelo. Normalmente el problema inverso es más difícil de resolver que su correspondiente problema directo. El problema inverso en TER obtiene la distribución de conductividades del subsuelo a partir de las medidas realizadas en la superficie.

El método para realizar el proceso de inversión de la seudosección de resistividad aparente fue propuesto por Loke y Baker (1995), el cual simplifica la realización de las rutinas y algoritmos de programación. Hace uso del método de optimización por mínimos cuadrados. El modelo considera discretizar el espacio de medición en bloques rectangulares de resistividad constante; la aproximación convencional usa un método de optimización no lineal iterativo para determinar la resistividad de los bloques (Montaño Mejía, F.H., Vega, P.A. 2009).

El método de suavizado forzado por mínimos cuadrados (deGroot-Hedlin y Constable, 1990) se puede usar para determinar la resistividad de los bloques. La ecuación de recurrencia para el proceso de inversión es:

$$(J^T J + \lambda C^T C) p - J^T g$$

Donde J es la matriz jacobiana de las derivadas parciales, J^T la matriz traspuesta, λ es el factor de amortiguamiento, g es el vector de discrepancia que contiene las diferencias logarítmicas entre los valores de resistividad aparente medidos y los calculados y p es el vector de corrección a los parámetros del modelo. El efecto del filtro C de aplanamiento 2D, es restringir la suavidad de los parámetros del modelo a algún valor constante. El logaritmo de los valores de resistividad del modelo se usa para el cálculo del vector de corrección p. El método de inversión se divide en tres pasos:

1. Calcular de los valores de resistividad aparente para el modelo por diferencias finitas o elementos finitos.
2. Calcular la matriz jacobiana de las derivadas parciales.
3. Resolver el sistema no lineal de ecuaciones.

El método de Loke y Baker (1995) supone como modelo inicial un suelo homogéneo, con lo cual se reduce la aplicación del primer paso; el segundo paso, resuelven los valores de las derivadas parciales usando la función de Green.

Teniendo en cuenta la aproximación de Barker (1992), donde los bloques rectangulares son dispuestos de manera similar a los puntos de datos de la seudosección de resistividad

aparente. El número de bloques rectangulares es el igual al número de puntos de datos. La profundidad del centro del bloque se localiza en la media de la profundidad de investigación (Edwards, 1977) del arreglo de electrodos. Para algunos conjuntos de datos, pueden obtenerse mejores resultados usando un modelo con bloques más delgados cercanos a la superficie y bloques más gruesos cerca del fondo. **Figura 5.14** (Montaño Mejía, F.H., Vega, P.A. 2009).

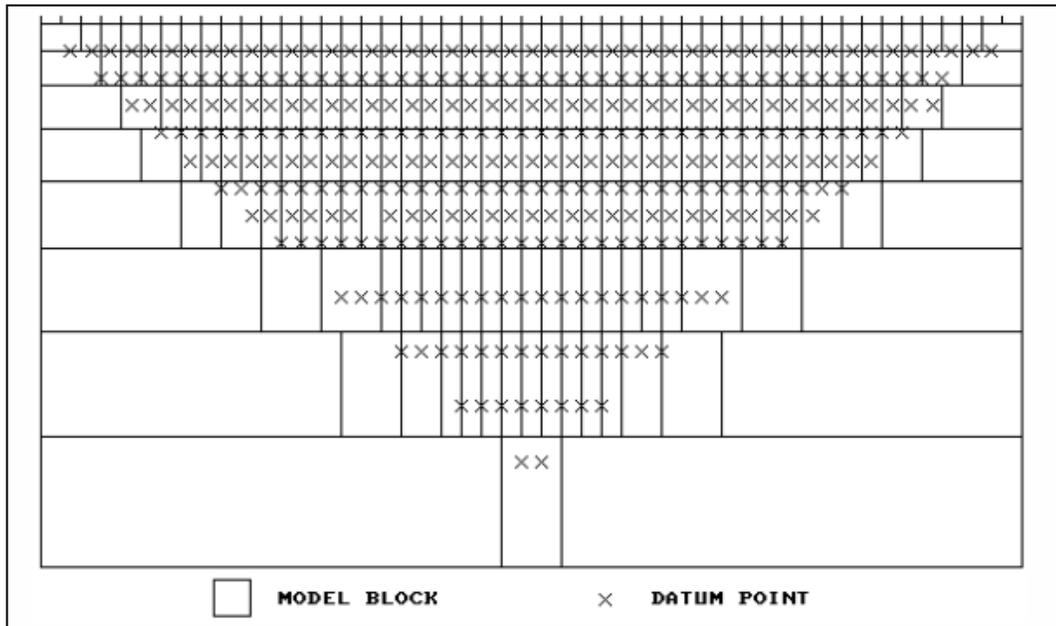


Figura 5.14. Arreglo de la distribución de los valores de resistividad obtenidos en campo para su procesamiento (tomado de Loke, 1999)

Las derivadas parciales $\partial\phi/\partial\rho$ para un bloque rectangular de dimensiones finitas están dadas por

$$\frac{\partial\phi}{\partial\rho} = \frac{I_s}{4\pi^2} \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a)+y^2+z^2}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2} [(x-a)^2+y^2+z^2]^{3/2}} dx dy dz$$

11. Tejero, et al, 2002, describen el algoritmo de mínimos cuadrados propuesto por Loke y Baker (1995, 1996) para expresar la resistividad aparente como una serie de Taylor

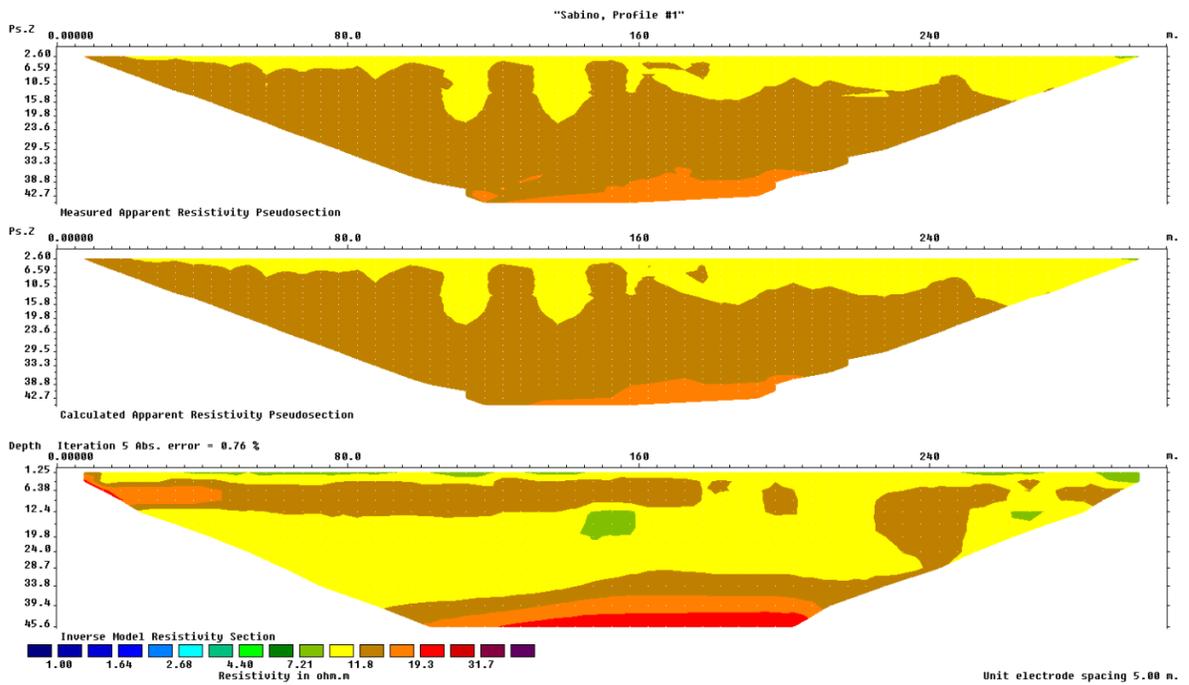
$$\rho_a = F(\vec{p}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k$$

Donde p_k es un vector de parámetros de dimensión M conformado por las resistividades verdaderas de cada bloque, Figura 5.14, $F(\vec{p})$ es la función que determina la resistividad aparente.

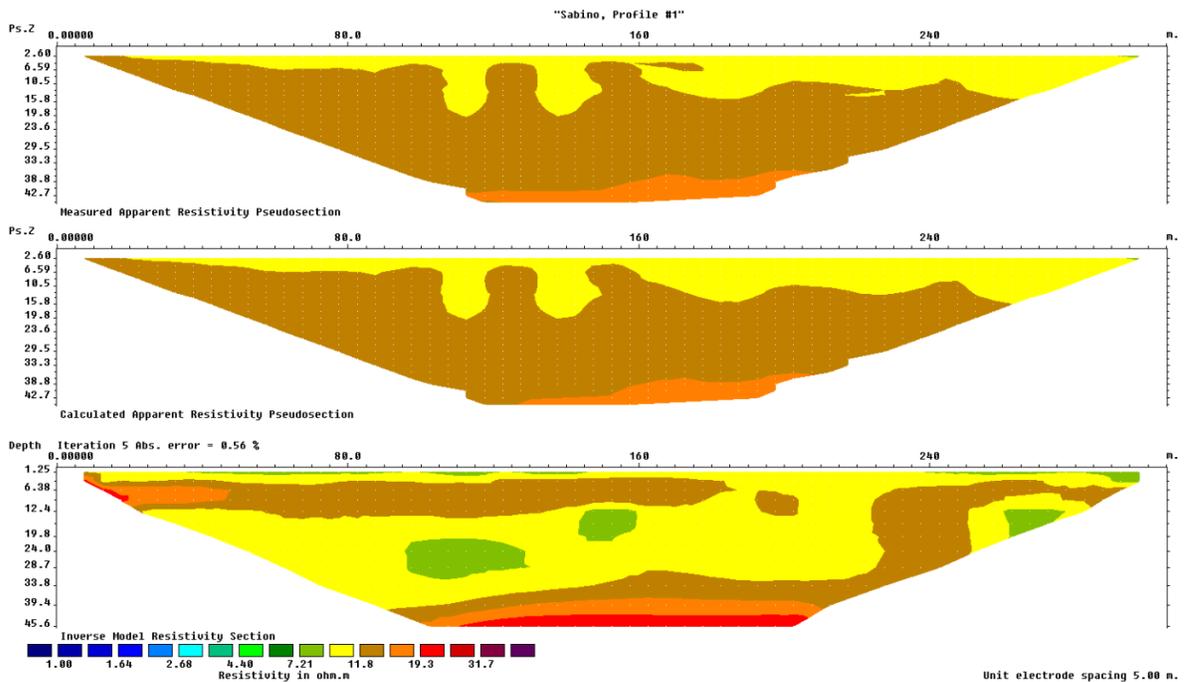
$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Hay que mencionar que por lo general el medio se comporta de forma heterogénea, por lo que los valores de resistividad serán aparentes.

12. Para identificar la distribución de las propiedades del subsuelo, se hace uso de software especializado. (Ver tabla 5.1).
13. Una vez obtenida la información se debe calibrar con información real del subsuelo que se tenga del área de estudio (pozo -posición del nivel del agua, profundidad total-corte litológico, geología superficial, sección geológica esquemática).
14. Generalmente el software proporciona un error cuadrático RMS que permite ver que tan acoplados están los valores de campo con los valores obtenido de la inversión; se considera que mientras más bajo sea este error mejor será nuestro resultado; sin embargo, hay que recordar que el resultado obtenido es producto de los cuerpos inmersos que se encuentran en el subsuelo, situación que físicamente no se ve, a menos que se realice la exploración directa para validar el dato. Una manera de validar el valor de RMS es la conceptualización que se tenga del sitio donde se realizó la medición.
15. Los resultados se presentan en forma de perfil. **Figura 5.15.** La **Figura 5.15a** corresponde a un perfil utilizando el dato crudo obtenido en campo y la **Figura 5.15b** corresponde a l mismo perfil donde se aplicó filtrado por nivel.



(a)



(b)

Figura 5.15. Resultados de un TER a) dato crudo; b) dato filtrado

5.3.5. Procesamiento de datos del TEM

Para el procesamiento de los datos con esta técnica de deben realizar las siguientes actividades:

1. Transferencia de los registros de datos de campos del equipo de adquisición a la computadora.
2. Convertir los archivos que genera el equipo de adquisición de datos a un formato que pueda revisar, corregir y realizar el procesamiento de los datos; Los softwares específicos como Temix, WingLink (*.sir, *.tem, *.txt), entre otros, traen esta función; sin embargo, la presentan en forma gráfica, al tener que desplazar las curvas (específicamente cuando se aplica cambio de ganancia al equipo de adquisición. En este trabajo se plantea la forma en que los datos se analizan previo a su procesamiento.
3. Trasladar los datos de los TEMs a una base de datos, por ejemplo, Excel. Debe presentarse los valores de ventana y voltaje, en columnas. Aquí es importante recalcar que, dado que la señal se maneja como estocástica, cada ventana de adquisición de datos del TEM es independiente. De ahí la necesidad de que, en el trabajo de campo, los datos se obtengan todos con las mismas características. En la **Figura 5.16** se muestra un ejemplo de una base de datos de un archivo de un solo TEM leído en formato USF. En la **Figura 5.17** se presenta la base de datos del TEM de los TEMs leídos en un solo sitio, para este ejemplo se obtuvieron 30 mediciones y una más de ruido.
4. Aplicar un análisis estadístico para obtener media y desviación estándar. **Figura 5.18.** Esta metodología fue propuesta de manera verbal por el Dr. Andrés Tejero Andrade, Profesor de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para definir una metodología de análisis de la señal la cual incluye, además:
 - a. Obtener la relación desviación estándar / media (en porcentaje). **Figura 5.18** (Coeficiente).
 - b. Graficar las curvas de los datos de las mediciones del TEM y agregar la o las señales de ruido. **Figura 5.19.**
5. Con las gráficas anteriores se tienen elementos para seleccionar la señal útil para realizar el procesamiento, como puede ser:
 - a. la sobreposición de la señal media con la señal de ruido o,
 - b. porcentaje de la relación desviación estándar / media o bien ambas.
6. Otra forma de seleccionar la señal útil es a través del *software* especializado. Cada cual tiene una metodología específica para seleccionar la señal útil.
7. Con base en lo hasta ahora expuesto, es necesario, específicamente cuando se usa el *software* especializado, tener en mente qué es lo que se está buscando y tener una idea de las condiciones que se presentan en el medio (conceptualización), para identificar y seleccionar los datos útiles que serán alimentados al *software* de procesamiento.
8. Una vez seleccionada la señal útil, organizarla para que pueda ser leída en el formato específico del programa de *software* seleccionado (Ver Tabla 5.1).

/ARRAY:	COINCIDENT	LOOP	TEM	
/DATE:	20180605			
/DAYTIME:	10.08			
/INSTRUMENT:	terraTEM			
/LOCATION:	0	0	0	
/VOLTAGE_UV/AMP				
/POINTS:	40			
/SOUNDING:	3			
/SOUNDING:	0			
/SWEEPS:	1			
/SWEEP_NUM:	1			
/CURRENT:	5.76			
/COIL_LOCATION:	0	0		
/COIL_SIZE:	22500			
/LOOP_SIZE:	150	150		
/RAMP_TIME:	1.99E-04			
/FREQUENCY:	3.75			
/TIME_DELAY:	0			
/END				
INDEX	TIME	WIDTH	VOLTAGE	ERROR_BAR
1	5.00E-05	5.00E-05	2.17E-01	1.38E-04
2	1.00E-04	5.00E-05	2.17E-01	1.38E-04
3	1.50E-04	5.00E-05	2.17E-01	1.38E-04
4	2.00E-04	5.00E-05	2.17E-01	2.37E-03
5	2.50E-04	5.00E-05	2.00E-01	2.89E-02
6	3.25E-04	1.00E-04	1.34E-01	3.05E-02
7	4.25E-04	1.00E-04	6.98E-02	1.07E-02
8	5.25E-04	1.00E-04	4.30E-02	5.49E-03
9	6.25E-04	1.00E-04	2.84E-02	3.17E-03
10	7.25E-04	1.00E-04	1.97E-02	1.97E-03
11	8.75E-04	2.00E-04	1.24E-02	2.13E-03
12	1.08E-03	2.00E-04	7.25E-03	9.96E-04
13	1.28E-03	2.00E-04	4.64E-03	5.63E-04
14	1.48E-03	2.00E-04	3.22E-03	3.07E-04
15	1.68E-03	2.00E-04	2.37E-03	2.18E-04
16	1.98E-03	4.00E-04	1.59E-03	2.35E-04
17	2.38E-03	4.00E-04	9.97E-04	1.30E-04
18	2.78E-03	4.00E-04	6.77E-04	7.77E-05
19	3.18E-03	4.00E-04	4.39E-04	5.86E-05
20	3.58E-03	4.00E-04	2.56E-04	5.26E-05
21	4.18E-03	8.00E-04	1.68E-04	4.23E-05
22	4.98E-03	8.00E-04	1.41E-04	3.56E-05
23	5.78E-03	8.00E-04	1.88E-04	5.29E-05
24	6.58E-03	8.00E-04	1.88E-04	4.33E-05
25	7.38E-03	8.00E-04	1.63E-04	5.53E-05
26	8.58E-03	1.60E-03	3.37E-05	6.44E-05
27	1.02E-02	1.60E-03	3.91E-06	6.60E-05
28	1.18E-02	1.60E-03	1.02E-04	3.08E-05
29	1.34E-02	1.60E-03	2.66E-05	7.02E-05
30	1.50E-02	1.60E-03	-8.40E-05	4.27E-05
31	1.74E-02	3.20E-03	6.43E-05	7.43E-05
32	2.06E-02	3.20E-03	-2.50E-05	5.54E-05
33	2.38E-02	3.20E-03	6.60E-05	7.20E-05
34	2.70E-02	3.20E-03	-4.10E-05	7.97E-05
35	3.02E-02	3.20E-03	-2.15E-05	9.11E-05
36	3.50E-02	6.40E-03	2.22E-05	7.90E-05
37	4.14E-02	6.40E-03	-1.41E-05	8.68E-05
38	4.78E-02	6.40E-03	-1.64E-05	7.97E-05
39	5.42E-02	6.40E-03	5.44E-05	8.05E-05
40	6.06E-02	6.40E-03	-1.17E-05	8.11E-05

Figura 5.16. Archivo de datos de un TEM leído de un formato USF.

Vent	TEM																														Ruido				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1	2.16E-01	2.15E-01	2.17E-01	2.17E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.21E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.23E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.24E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.24E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.25E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.29E-01	2.31E-01	2.32E-01	2.28E-01	2.27E-01	2.31E-01	3.95E-05
2	2.16E-01	2.15E-01	2.17E-01	2.17E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.21E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.23E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.24E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.24E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.25E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.29E-01	2.31E-01	2.32E-01	2.28E-01	2.27E-01	2.31E-01	2.89E-05
3	2.16E-01	2.15E-01	2.17E-01	2.17E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.21E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.23E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.24E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.24E-01	2.23E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.25E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.27E-01	2.29E-01	2.31E-01	2.32E-01	2.28E-01	2.27E-01	2.31E-01	1.89E-05
4	2.15E-01	2.14E-01	2.17E-01	2.15E-01	2.16E-01	2.18E-01	2.15E-01	2.16E-01	2.15E-01	2.16E-01	2.17E-01	2.15E-01	2.15E-01	2.15E-01	2.15E-01	2.18E-01	2.17E-01	2.19E-01	2.16E-01	2.18E-01	2.19E-01	2.19E-01	2.19E-01	2.19E-01	2.19E-01	2.19E-01	2.21E-01	2.22E-01	2.23E-01	2.20E-01	2.21E-01	2.23E-01	4.81E-05		
5	1.97E-01	1.96E-01	2.00E-01	1.99E-01	2.01E-01	2.03E-01	2.01E-01	2.02E-01	2.02E-01	2.06E-01	2.07E-01	2.03E-01	2.05E-01	2.06E-01	2.07E-01	2.09E-01	2.06E-01	2.06E-01	2.05E-01	2.08E-01	2.10E-01	2.12E-01	2.08E-01	2.07E-01	2.12E-01	2.13E-01	2.11E-01	2.10E-01	2.11E-01	2.12E-01	2.12E-01	6.93E-05			
6	1.33E-01	1.32E-01	1.34E-01	1.31E-01	1.31E-01	1.33E-01	1.30E-01	1.30E-01	1.29E-01	1.30E-01	1.30E-01	1.28E-01	1.28E-01	1.30E-01	1.29E-01	1.30E-01	1.30E-01	1.32E-01	1.31E-01	1.30E-01	1.29E-01	1.29E-01	1.28E-01	1.29E-01	1.29E-01	1.29E-01	1.29E-01	1.28E-01	1.27E-01	1.31E-01	1.29E-01	6.44E-05			
7	6.96E-02	6.95E-02	6.98E-02	6.89E-02	6.90E-02	6.98E-02	6.90E-02	6.91E-02	6.86E-02	6.87E-02	6.86E-02	6.81E-02	6.77E-02	6.84E-02	6.80E-02	6.82E-02	6.82E-02	6.91E-02	6.91E-02	6.84E-02	6.81E-02	6.77E-02	6.79E-02	6.83E-02	6.79E-02	6.80E-02	6.79E-02	6.75E-02	6.85E-02	6.80E-02	5.15E-05				
8	4.30E-02	4.28E-02	4.30E-02	4.24E-02	4.25E-02	4.30E-02	4.25E-02	4.26E-02	4.24E-02	4.25E-02	4.24E-02	4.21E-02	4.19E-02	4.22E-02	4.21E-02	4.21E-02	4.21E-02	4.21E-02	4.26E-02	4.27E-02	4.23E-02	4.22E-02	4.18E-02	4.20E-02	4.23E-02	4.20E-02	4.21E-02	4.21E-02	4.18E-02	4.23E-02	4.21E-02	2.16E-05			
9	2.84E-02	2.82E-02	2.84E-02	2.80E-02	2.81E-02	2.84E-02	2.81E-02	2.82E-02	2.80E-02	2.82E-02	2.80E-02	2.79E-02	2.77E-02	2.80E-02	2.79E-02	2.78E-02	2.78E-02	2.82E-02	2.82E-02	2.80E-02	2.79E-02	2.77E-02	2.78E-02	2.81E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.78E-02	2.76E-02	2.80E-02	2.78E-02	4.06E-05				
10	1.96E-02	1.94E-02	1.97E-02	1.93E-02	1.94E-02	1.97E-02	1.94E-02	1.95E-02	1.94E-02	1.95E-02	1.94E-02	1.93E-02	1.93E-02	1.93E-02	1.93E-02	1.92E-02	1.92E-02	1.95E-02	1.95E-02	1.94E-02	1.94E-02	1.92E-02	1.92E-02	1.92E-02	1.92E-02	1.92E-02	1.94E-02	1.92E-02	1.93E-02	1.93E-02	1.91E-02	1.93E-02	5.43E-05		
11	1.23E-02	1.21E-02	1.24E-02	1.20E-02	1.21E-02	1.23E-02	1.21E-02	1.22E-02	1.21E-02	1.23E-02	1.22E-02	1.21E-02	1.21E-02	1.21E-02	1.21E-02	1.22E-02	1.20E-02	1.19E-02	1.22E-02	1.22E-02	1.22E-02	1.22E-02	1.21E-02	1.20E-02	1.20E-02	1.22E-02	1.20E-02	1.21E-02	1.20E-02	1.21E-02	1.20E-02	4.25E-05			
12	7.15E-03	6.93E-03	7.25E-03	6.95E-03	6.99E-03	7.17E-03	7.01E-03	7.02E-03	6.94E-03	7.20E-03	7.10E-03	7.06E-03	7.04E-03	6.97E-03	7.18E-03	6.92E-03	6.86E-03	7.09E-03	7.07E-03	7.17E-03	7.08E-03	6.96E-03	7.00E-03	7.09E-03	6.95E-03	7.02E-03	7.00E-03	6.94E-03	7.00E-03	6.95E-03	7.11E-05				
13	4.53E-03	4.36E-03	4.64E-03	4.42E-03	4.46E-03	4.58E-03	4.48E-03	4.44E-03	4.25E-03	4.65E-03	4.56E-03	4.49E-03	4.48E-03	4.42E-03	4.63E-03	4.38E-03	4.33E-03	4.51E-03	4.48E-03	4.61E-03	4.53E-03	4.44E-03	4.43E-03	4.49E-03	4.33E-03	4.47E-03	4.48E-03	4.41E-03	4.44E-03	4.40E-03	4.83E-05				
14	3.06E-03	2.91E-03	3.22E-03	3.03E-03	3.05E-03	3.13E-03	3.11E-03	2.98E-03	2.94E-03	3.22E-03	3.17E-03	3.07E-03	3.05E-03	3.02E-03	3.23E-03	3.00E-03	2.89E-03	3.09E-03	3.08E-03	3.24E-03	3.10E-03	3.06E-03	3.05E-03	3.06E-03	2.91E-03	3.01E-03	3.08E-03	3.02E-03	3.04E-03	3.00E-03	6.10E-05				
15	2.23E-03	2.10E-03	2.37E-03	2.18E-03	2.14E-03	2.28E-03	2.25E-03	2.13E-03	2.14E-03	2.40E-03	2.29E-03	2.22E-03	2.19E-03	2.19E-03	2.42E-03	2.19E-03	2.09E-03	2.24E-03	2.23E-03	2.40E-03	2.27E-03	2.24E-03	2.19E-03	2.21E-03	2.09E-03	2.28E-03	2.21E-03	2.20E-03	2.20E-03	2.15E-03	5.06E-05				
16	1.45E-03	1.36E-03	1.59E-03	1.49E-03	1.44E-03	1.54E-03	1.49E-03	1.45E-03	1.32E-03	1.65E-03	1.55E-03	1.50E-03	1.41E-03	1.45E-03	1.68E-03	1.48E-03	1.38E-03	1.48E-03	1.48E-03	1.66E-03	1.56E-03	1.53E-03	1.49E-03	1.52E-03	1.37E-03	1.37E-03	1.53E-03	1.49E-03	1.47E-03	1.46E-03	8.45E-05				
17	9.26E-04	9.06E-04	9.97E-04	9.73E-04	8.66E-04	1.03E-03	9.57E-04	9.17E-04	8.47E-04	1.07E-03	9.69E-04	1.00E-03	8.34E-04	9.47E-04	1.12E-03	9.76E-04	8.83E-04	8.94E-04	9.41E-04	1.12E-03	9.91E-04	9.93E-04	9.51E-04	9.78E-04	8.30E-04	8.15E-04	1.01E-03	9.82E-04	9.33E-04	9.36E-04	6.25E-05				
18	6.42E-04	6.73E-04	6.77E-04	6.72E-04	5.88E-04	7.15E-04	6.30E-04	6.62E-04	5.58E-04	6.47E-04	6.92E-04	6.81E-04	5.32E-04	7.13E-04	7.55E-04	7.04E-04	6.55E-04	6.32E-04	6.63E-04	6.91E-04	7.09E-04	6.43E-04	6.36E-04	5.88E-04	5.47E-04	6.96E-04	6.94E-04	6.52E-04	6.57E-04	5.24E-05					
19	4.40E-04	5.31E-04	4.39E-04	5.25E-04	4.31E-04	5.44E-04	4.50E-04	4.70E-04	4.44E-04	4.69E-04	5.32E-04	4.74E-04	3.68E-04	5.51E-04	5.03E-04	5.51E-04	5.34E-04	5.30E-04	5.38E-04	6.08E-04	5.07E-04	5.76E-04	4.96E-04	4.78E-04	4.19E-04	3.90E-04	4.97E-04	5.30E-04	4.98E-04	4.98E-04	1.24E-05				
20	3.79E-04	5.13E-04	2.56E-04	3.79E-04	3.11E-04	3.93E-04	3.58E-04	3.35E-04	4.74E-04	2.99E-04	4.54E-04	3.51E-04	2.62E-04	4.40E-04	3.31E-04	4.51E-04	5.22E-04	4.58E-04	4.28E-04	4.43E-04	3.56E-04	4.43E-04	4.22E-04	3.78E-04	4.25E-04	2.86E-04	3.74E-04	4.07E-04	4.08E-04	4.04E-04	-3.01E-05				
21	3.55E-04	3.63E-04	1.68E-04	2.54E-04	2.29E-04	2.43E-04	2.83E-04	2.60E-04	4.44E-04	1.88E-04	3.04E-04	2.66E-04	2.21E-04	2.94E-04	1.99E-04	2.95E-04	4.50E-04	3.45E-04	3.14E-04	2.42E-04	2.93E-04	3.26E-04	3.59E-04	3.20E-04	3.76E-04	2.62E-04	3.28E-04	2.92E-04	3.22E-04	3.09E-04	-6.64E-05				
22	3.43E-04	1.97E-04	1.41E-04	2.21E-04	2.01E-04	1.46E-04	2.67E-04	2.07E-04	3.81E-04	1.05E-04	1.34E-04	2.17E-04	2.39E-04	1.61E-04	1.35E-04	1.71E-04	3.76E-04	2.73E-04	2.52E-04	8.40E-05	2.09E-04	2.24E-04	2.38E-04	2.82E-04	3.39E-04	2.89E-04	1.74E-04	1.79E-04	2.55E-04	2.03E-04	-5.55E-05				
23	2.67E-04	9.40E-05	1.88E-04	1.52E-04	1.62E-04	9.60E-05	2.79E-04	1.97E-04	2.28E-04	2.06E-04	1.48E-04	2.13E-04	2.00E-04	6.57E-05	2.03E-04	8.70E-05	2.51E-04	2.34E-04	1.78E-04	6.92E-05	1.64E-04	1.96E-04	1.31E-04	2.52E-04	3.06E-04	2.59E-04	1.84E-04	1.24E-04	1.86E-04	1.53E-04	-5.03E-05				
24	1.65E-04	8.13E-06	1.88E-04	1.08E-04	9.93E-05	7.34E-05	1.99E-04	1.53E-04	5.83E-05	1.97E-04	1.40E-04	1.92E-04	1.04E-04	2.90E-05	2.36E-04	6.32E-06	9.99E-05	1.19E-04	1.19E-04	1.74E-04	8.41E-05	2.14E-04	1.03E-04	1.40E-04	1.94E-04	1.69E-04	1.75E-04	9.39E-05	1.21E-04	1.10E-04	-6.42E-05				
25	-1.89E-05	2.46E-05	1.63E-04	1.31E-04	8.56E-05	9.16E-05	1.41E-04	1.42E-04	-1.34E-05	1.71E-04	5.47E-05	1.50E-04	-2.31E-05	8.78E-05	1.82E-04	5.43E-05	3.10E-05	2.70E-05	6.36E-05	2.22E-04	5.17E-05	1.56E-04	1.25E-04	3.42E-05	9.19E-05	2.31E-05	1.50E-04	8.24E-05	6.68E-05	6.87E-05	-5.80E-05				
26	-4.90E-05	1.51E-04	3.37E-05	1.47E-04	6.53E-05	-1.44E-05	1.40E-04	1.34E-04	7.44E-05	1.61E-05	5.31E-05	4.13E-05	-4.37E-05	1.10E-04	5.64E-06	8.77E-05	1.21E-04	2.99E-05	8.23E-05	1.14E-04	-1.85E-05	9.29E-05	7.25E-05	-2.74E-05	9.62E-05	-3.30E-05	8.50E-05	7.25E-05	6.14E-05	5.79E-05	-7.23E-05				
27	5.62E-05	1.70E-04	3.91E-06	4.87E-05	9.82E-05	-4.23E-06	7.44E-05	8.95E-05	1.94E-04	3.25E-06	1.04E-05	1.89E-05	1.06E-04	1.05E-04	-1.26E-04	8.46E-05	1.56E-04	8.69E-05	5.64E-05	-8.68E-05	2.74E-06	3.96E-05	6.09E-05	3.38E-05	1.57E-04	1.27E-04	5.34E-05	4.12E-05	8.01E-05	7.69E-05	-4.01E-05				
28	6.91E-05	-3.78E-06	1.02E-04	2.91E-05	1.43E-04	1.33E-04	8.49E-05	7.82E-05	1.47E-05	1.40E-04	-2.67E-06	7.29E-05	1.61E-04	1.50E-05	7.71E-05	1.75E-05	-5.68E-05	3.90E-05	-1.66E-05	-6.92E-06	8.24E-05	1.91E-05	6.20E-06	7.72E-05	5.94E-05	1.47E-04	5.86E-05	4.40E-05	4.60E-05	3.37E-05	-5.22E-06				
29	-7.41E-05	4.70E-05	2.66E-05	2.75E-05	1.43E-05	1.22E-04	-4.56E-05	-1.21E-07	-1.09E-04	8.02E-05	8.04E-05	-8.91E-06	-4.30E-06	7.04E-05	6.82E-05	5.25E-05	-1.25E-04	-																	

ventana	Media	Desviación estándar	mediana	coeficiente
1	2.24E-01	4.37E-03	2.23E-01	2%
2	2.24E-01	4.37E-03	2.23E-01	2%
3	2.24E-01	4.37E-03	2.23E-01	2%
4	2.18E-01	2.59E-03	2.17E-01	1%
5	2.06E-01	4.69E-03	2.06E-01	2%
6	1.30E-01	1.63E-03	1.30E-01	1%
7	6.85E-02	6.43E-04	6.84E-02	1%
8	4.23E-02	3.43E-04	4.23E-02	1%
9	2.80E-02	2.19E-04	2.80E-02	1%
10	1.94E-02	1.51E-04	1.93E-02	1%
11	1.21E-02	1.11E-04	1.21E-02	1%
12	7.04E-03	9.63E-05	7.02E-03	1%
13	4.47E-03	9.50E-05	4.47E-03	2%
14	3.06E-03	9.19E-05	3.05E-03	3%
15	2.22E-03	9.09E-05	2.21E-03	4%
16	1.49E-03	8.71E-05	1.49E-03	6%
17	9.53E-04	7.66E-05	9.54E-04	8%
18	6.60E-04	6.21E-05	6.62E-04	9%
19	4.94E-04	5.50E-05	4.98E-04	11%
20	3.91E-04	6.82E-05	3.98E-04	17%
21	2.93E-04	6.74E-05	2.94E-04	23%
22	2.22E-04	7.55E-05	2.13E-04	34%
23	1.82E-04	6.30E-05	1.87E-04	35%
24	1.29E-04	5.95E-05	1.20E-04	46%
25	8.73E-05	6.38E-05	8.40E-05	73%
26	5.86E-05	5.84E-05	6.89E-05	100%
27	6.05E-05	6.87E-05	5.87E-05	114%
28	5.55E-05	5.41E-05	5.23E-05	98%
29	1.04E-05	6.38E-05	1.83E-05	616%
30	5.59E-06	6.24E-05	1.86E-05	1117%
31	1.35E-05	4.25E-05	1.31E-05	314%
32	-4.10E-06	3.80E-05	-2.80E-06	-928%
33	1.18E-05	4.82E-05	3.41E-08	408%
34	2.31E-05	4.96E-05	2.30E-05	214%
35	-1.30E-05	5.35E-05	-1.67E-05	-413%
36	-2.03E-06	2.36E-05	7.20E-07	-1161%
37	7.84E-06	2.75E-05	8.57E-06	351%
38	4.07E-06	2.93E-05	-2.60E-06	720%
39	-3.89E-06	2.90E-05	2.09E-06	-745%
40	5.79E-06	3.03E-05	2.00E-06	523%

Figura 5.18. Análisis estadístico

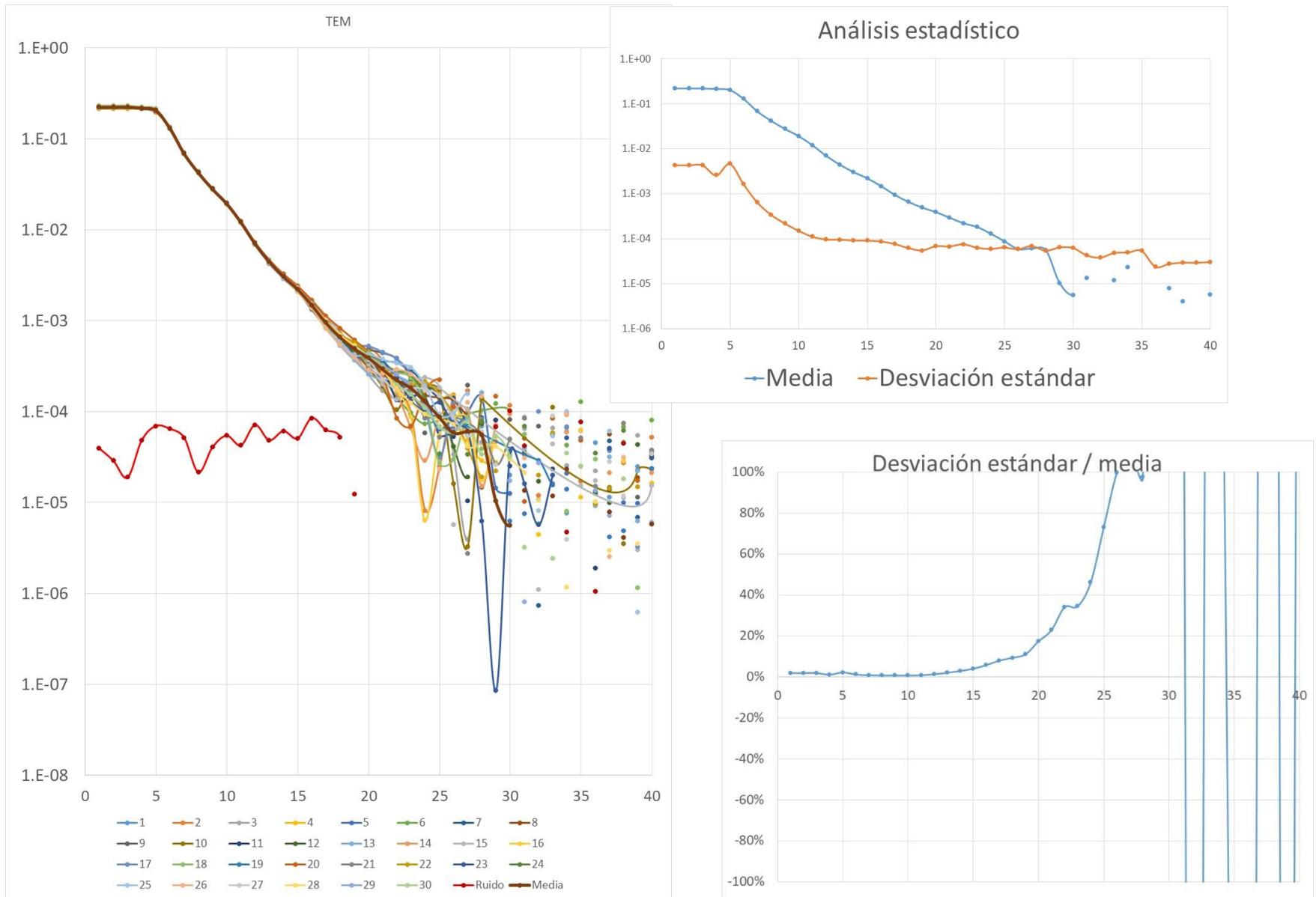


Figura 5.19. Análisis de la señal de TEM previo al procesamiento

9. El siguiente paso es la obtención de los valores de resistividad.

Previo a la obtención de los datos de resistividad, se verán algunos aspectos teóricos con el fin de justificar el cálculo de los valores de resistividad.

Como se mencionó en el capítulo anterior, en la parte del principio físico del TEM 4.2.3, se puede afirmar que la conceptualización del método propuesto por Mc Neill, (1996), Figuras 4.17 y 4.26, es fácil de entender: El proceso de reducir bruscamente la corriente del transmisor a cero induce, de acuerdo con la ley de Faraday, un pulso de voltaje de corta duración en el suelo, lo que hace que fluya a través de la bobina transmisora una de corriente eléctrica. Cuando se apaga la corriente, esta pasa al subsuelo debajo de la bobina transmisora y, debido a la resistividad finita del suelo, la amplitud de la corriente comienza a decaer inmediatamente. El flujo de corriente más profundo también decae e induce un flujo de corriente aún más profundo y así sucesivamente. Para determinar el voltaje producido por el campo magnético en la bobina receptora, se realizan mediciones del flujo de corriente y, por lo tanto, también de la resistividad eléctrica de la tierra a profundidades cada vez mayores. Este es el concepto base de resistividad del método.

La caída de voltaje en el receptor se determina por ventanas; cada una de las cuales mide y registra la amplitud del decaimiento del voltaje. Cada ventana difiere con el tiempo. El equipo de medición toma el valor promedio de la ventana. En la medida que pasa el tiempo, las ventanas son más anchas con el propósito de mejorar la relación señal-ruido.

Con base en lo anterior, la respuesta de voltaje se puede dividir en tres partes: una etapa temprana (*Early Time Stage*, donde la respuesta es constante con el tiempo), una etapa intermedia (*Intermediate Stage*, la forma de respuesta varía continuamente con el tiempo) y una etapa tardía (*Late Time*, a respuesta es una línea recta en una gráfica de log-log). **Figura 5.20.**

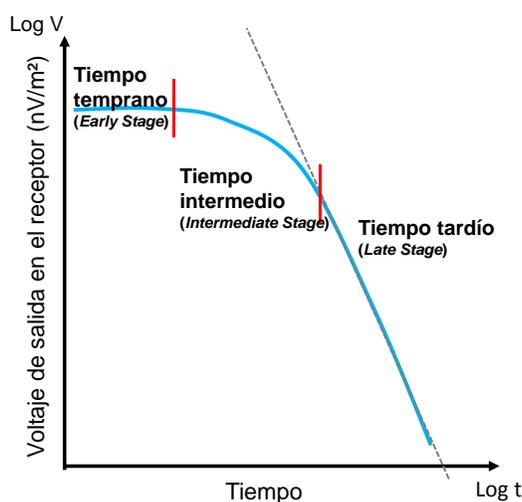


Figura 5.20. Respuesta idealizada de un semiespacio homogéneo (McNeill, 1994)

La respuesta varía simplemente con el tiempo y la conductividad como:

$$V(t) = \frac{k_1 M \sigma^{3/2}}{t^{5/2}}$$

Donde k_1 = constante.

M = Producto de la corriente (Ampere) por el área (m^2).

σ = Conductividad del terreno (Siemens/m).

t = Tiempo (segundos).

$V(t)$ = Voltaje de salida de una bobina sencilla de una sola vuelta que cubre el área de medición.

Solo con fines de comparación, hay que tener en cuenta que, a diferencia de las mediciones de resistividad convencionales, donde el voltaje medido varía linealmente con la resistividad del terreno, en el TEM el voltaje medido varía como $\sigma^{3/2}$; es mas sensible a pequeñas variaciones.

El cálculo de la resistividad aparente, dado que $\rho = 1/\sigma$, se expresa como:

$$\rho_a(t) = \frac{k_2 M^{2/3}}{e(t)^{2/3} t^{5/3}}$$

$V(t)$ también se puede expresar como

$$V(t) = I_0 \frac{C_{CL} (\mu_0 \sigma r^2)^{3/2}}{10 \pi^{1/2} t^{5/2}}$$

Y dado que en el tiempo tardío la resistividad aparente se define como

$$\rho_a = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{2I_0 \mu_0 A_r n_r A_s n_s}{5t^{5/2} V} \right)$$

Donde:

- ρ_a es la resistividad aparente [Ohm-m]
- $V(t)$ es la respuesta de voltaje del receptor [V]
- I_0 es la corriente del transmisor [A]
- $C_{CL} = A_s n_s A_r n_r (\mu_0 / 2\pi r^3)$
- A_s es el área de la bobina del transmisor [m^2]
- n_s es el número de vueltas de la bobina en el circuito del transmisor
- A_r es el área de la bobina receptora [m^2]
- n_r es el número de vueltas de la bobina receptora
- t es el tiempo de apagado (*Turn Off*) [s]

- r es el radio de la bobina del transmisor [m]
- μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío [H / m]

Cada equipo de adquisición ajusta la ecuación, es necesario conocerla.

10. Se puede aplicar también un filtrado lineal a la señal, una vez seleccionado el intervalo de tiempo que se va a realizar el procesamiento.
11. Para identificar la distribución de las propiedades del subsuelo, se hace uso de software especializado. (Ver tabla 5.1).
12. Para la captura de los datos los programas son específicos, solicitan el tipo de arreglo de bobina, corriente, turn off, y área, entre otros. **Figura 5.21**

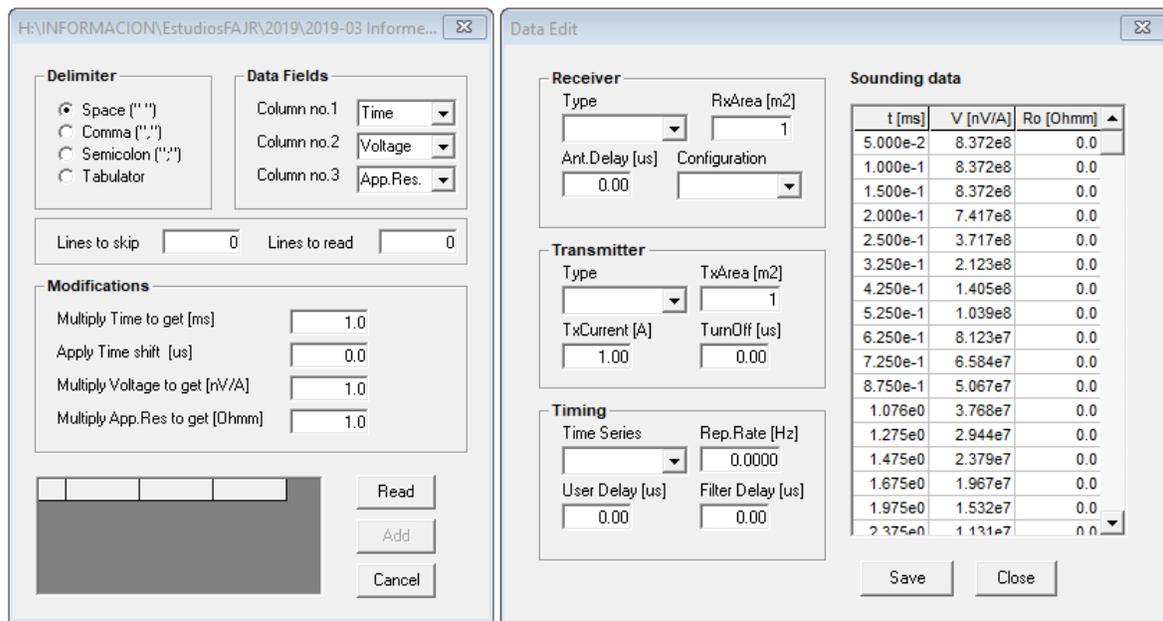


Figura 5.21. Ejemplo sobre qué datos solicita el software WinGlink

Sobre las dimensiones del área es aquí donde se tiene que introducir el valor correcto del área, convertirla a un área de un cuadrado.

13. Una vez obtenidos los datos ajustados, se pasa al proceso del procesamiento para obtener el modelo directo y los modelos inversos.
14. Generalmente el software proporciona un error cuadrático RMS que permite ver que tan acoplados están los valores de campo con los valores obtenido de la inversión; se considera que mientras más bajo sea este error mejor será nuestro resultado; sin embargo, hay que recordar que el resultado obtenido es producto de los cuerpos inmersos que se encuentran en el subsuelo, situación que físicamente no se ve, a menos que se realice la exploración directa para validar el dato. Una manera de validar el valor de RMS es la conceptualización que se tenga del sitio donde se realizó la medición.
15. Los resultados se presentan en forma de perfil o modelos unidimensionales individuales **Figura 5.22** y **Figura 5.23**.

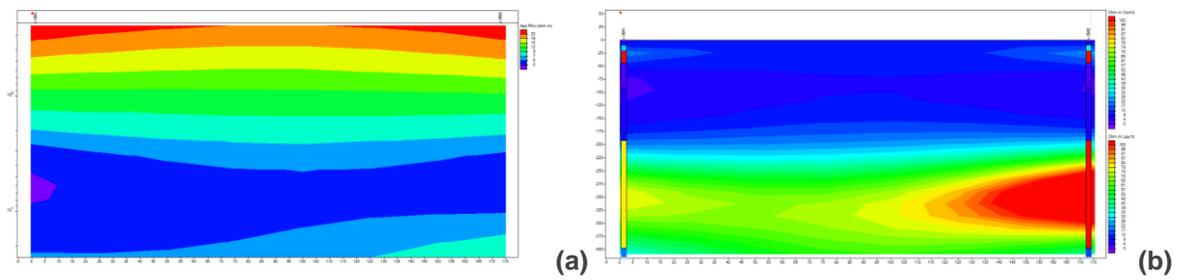


Figura 5.22. Ejemplo de Perfil de seudoresistividad (a) y resistividad (b) que arroja el software *WinGlink*

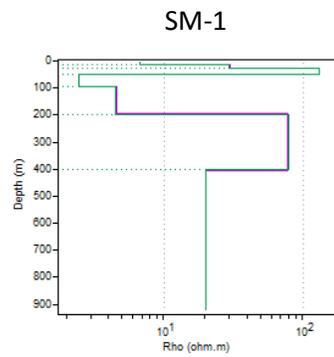


Figura 5.23. Ejemplo de modelo unidimensional interpretado y obtenido con el software *WinGlink*

Capítulo VI. Interpretación

En la **Figura 6.1** se muestra el proceso que debe realizarse para la interpretación de los datos e información obtenida del procesamiento



Figura 6.1. Proceso de interpretación

La presentación o representación del procesamiento de la información incluye:

- Identificación de anomalías y valores atípicos en series o matrices de datos.
- Representación de tendencias y patrones.
- Comparación entre varios conjuntos de datos de la Hidrogeofísica e hidrogeológicos.
- Interconexión de datos con otras áreas de conocimiento.
- Base para su incorporación a Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El análisis de datos puede realizarse a través de datos puntuales o de información distribuida en dos y tres dimensiones. Para el caso de este trabajo se tratará el análisis puntual y 2D, ya que es el que se obtiene principalmente de los métodos SEV, TER y TEM; los casos donde se obtiene información aérea (como gravimetría, magnetometría y otros métodos) se considera como información espacial donde los datos puntuales son procesados o mostrados en un contexto geográfico, como un mapa.

Con fines explicativos, en la **Figura 6.2** se muestra un perfil de resistividad (datos de campo) los cuales se configuran y se muestran en color y/o líneas de igual valor numérico de la propiedad medida. Se identifican diferentes cuerpos con diferente valor de resistividad en diferente posición. Cada una de estas anomalías refleja un cambio en el medio geológico o hidrogeológico.

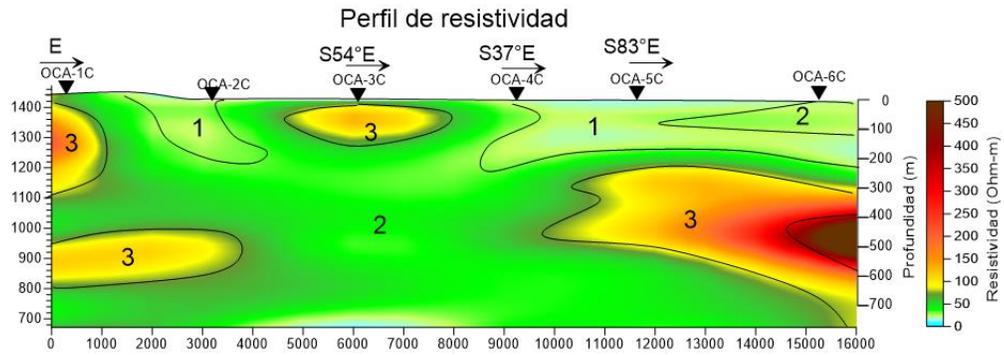


Figura 6.2. Ejemplo de la presentación de un perfil de resistividad

En la **Figura 6.3** se muestra un perfil de corte geoelectrico en el cual, los modelos unidimensionales del SEV, TER o TEM se expresan en una gráfica lineal con diferente valor de resistividad en profundidad. En esta situación se observan diferentes contrastes de la propiedad tanto en forma vertical como horizontal. A estos contrastes se les denomina Unidades Geoelectricas y son representativas de las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio medido; se identifican por una letra. Se recomienda usar las gráficas de resistividad unidimensional con sus valores, con el propósito de asociar valores de propiedad, de manera lateral, que se encuentren dentro de un rango que refleje que se trata del mismo medio medido.

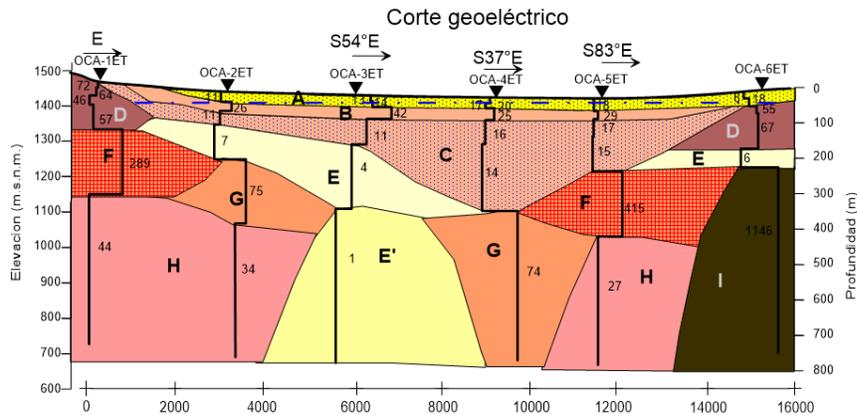


Figura 6.3. Ejemplo de la presentación de un perfil de corte geoelectrico

La **Figura 6.4** muestra un ejemplo de la distribución de la propiedad en planta. En este caso hay que hacer una descripción de las variaciones laterales que se presentan en cada uno de los mapas a diferente profundidad.

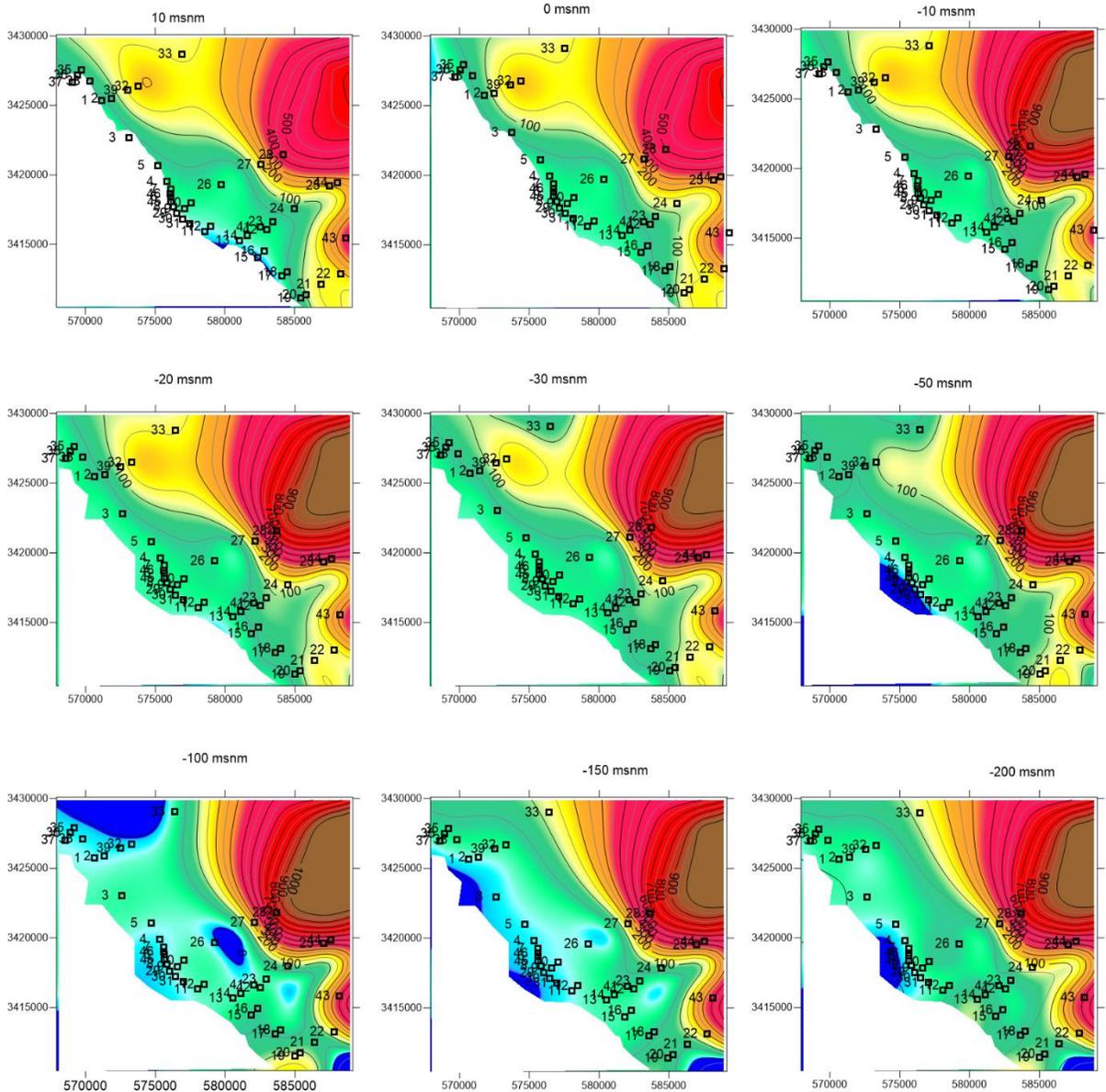


Figura 6.4. Ejemplo de la interpretación de mapas a diferente profundidad de investigación

Los estudios hidrogeológicos requieren de una evaluación cuantitativa sobre la presencia y el movimiento del agua en el subsuelo. Dependiendo de los objetivos específicos de cada estudio, las zonas donde se lleva a cabo el movimiento del agua subterránea se pueden clasificar en: zona saturada, zona vadosa, suelo poco profundo y acuíferos profundos. Las cuatro zonas difieren no solo en términos de su función y mecanismos hidrológicos, sino también en términos de las mediciones de Hidrogeofísica que se puedan realizar de forma rentable. En el capítulo 1.2, Figura 1.1, se trató sobre el nivel de caracterización de los estudios geofísicos, cabe mencionar que el común denominador en las zonas mencionadas es la comprensión de la dinámica de los fluidos (agua – aire). Ahora bien, independientemente del comportamiento hidrogeológico se pueden presentar dos marcos generales para abordar la comprensión de esta dinámica, (Binley, A., et al, 2010).

1. Buscar una relación directa entre la geofísica (propiedades físicas del medio) y los parámetros hidrogeológicos; por ejemplo, resistividad con conductividad hidráulica. En este punto Kelly, 1977; Mazác et al, 1985, Cabrales, 2001, realizaron una prueba de la correlación hidrodinámica (conductividad hidráulica-transmisividad-conductividad eléctrica); sin embargo, su aplicación ha sido limitada ya que la incertidumbre que se presenta en la relación es demasiado amplia y específica, sólo del sitio donde se realizó el trabajo. En este aspecto es necesario entender mejor la relación que propone Archie (1942) con el Factor de Formación y la porosidad de estancamiento y porosidad de flujo, (Arroyo, 1996).
2. Aprovechar las propiedades físicas obtenidas con la geofísica y las variables del estado hidrológico; por ejemplo, contenido de humedad o salinidad del agua. Son relaciones que también se pueden establecer entre cantidades geofísicas y variables hidrogeológicas, generalmente en relaciones empíricas o semi empíricas. Usando tales relaciones, es posible, aunque no siempre sencillo, obtener estimaciones cuantitativas de los datos hidrogeológicos que se utilizarán para la calibración de los modelos hidrogeológicos, identificando así los parámetros de interés. En la **Figura 6.5** se muestra el esquema para llegar al resultado deseado.

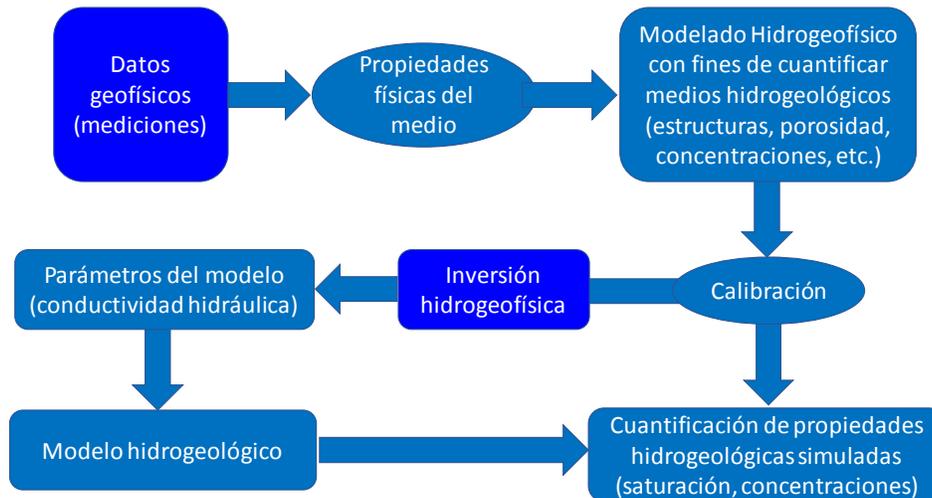


Figura 6.5. Esquema general de la inversión Hidrogeofísica basada en la calibración de modelos hidrogeológicos sobre cantidades hidrogeológicas estimadas derivadas de los datos geofísicos (modificado de Binley, A., et al, 2010).

3. Identificación de parámetros hidrogeológicos a través de la calibración del modelo generado.

Desde el punto de vista de geofísica, la física del problema determina qué datos “d” corresponden a un modelo “m” dado. El problema de calcular la respuesta del modelo (“datos” sintéticos), dado un modelo se denomina problema directo. (Scales, J. A. y Snieder, R. 2000). En la **Figura 6.6**, se muestra la visión convencional de los problemas inversos: encontrar el modelo que prediga las medidas de campo.

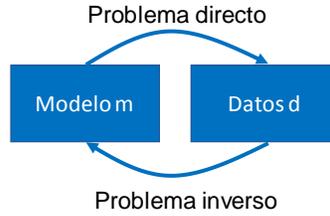


Figura 6.6. Visión convencional de los problemas inversos (tomado de Scales, J. A. y Snieder, R. 2000)

Una parte importante de la interpretación Hidrogeofísica es la traducción de los valores obtenidos a términos hidrogeológicos. Para el caso de este trabajo, donde se enfoca a las propiedades eléctricas de los medios.

Los valores de resistividad proporcionan estimación de las litologías. Puede suceder que una misma formación presente varios valores de resistividad contrastantes, los cuales se pueden asociar a la posición del nivel estático o presencia de una nube de contaminación provocada por una fuente, así como también cambios de facies o contenidos de salinidad; por otra parte, a veces los límites geológicos o hidrogeológicos no son detectables si los espesores de las capas a investigar son muy delgados. Lo anterior implica que es necesario tener siempre en mente la conceptualización del medio, la forma y la cantidad de datos a medir, para tener una caracterización más real del medio investigado. En la **Figura 6.7** se muestra un ejemplo de la interpretación asociando los resultados geofísicos a las condiciones geológicas e hidrogeológicas de una zona evaluada.

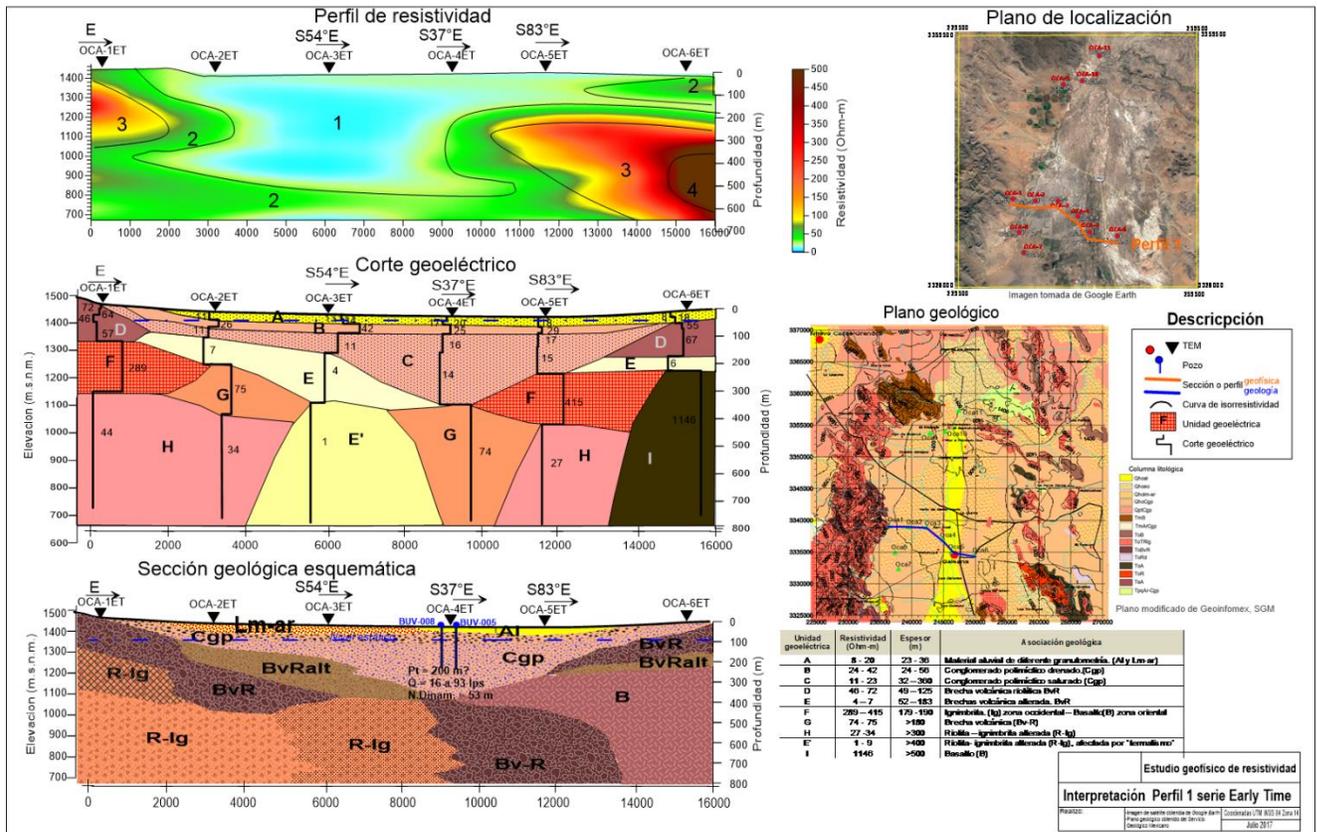


Figura 6.7. Ejemplo de interpretación geológica-hidrogeológica-geofísica

Capítulo VII. Integración

En la última década, se tienen muchos avances asociados con la geofísica superficial como apoyo para la caracterización hidrogeológica; sin embargo, al ser una nueva área de oportunidad hay mucho por hacer en la Hidrogeofísica.

Se han utilizado muchos enfoques diferentes de integración y estimación para fusionar datos hidrogeológicos y geofísicos. La elección de qué método utilizar generalmente depende de la densidad de datos, los objetivos del proyecto y la experiencia del intérprete. La integración se basa en datos, modelos y/o conceptos y puede abordarse utilizando métodos determinísticos o estocásticos. (Hubbard, S., Rubin, Y., 2005).

Para realizar la integración de mediciones geofísicas con mediciones geológicas e hidrogeológicas, se debe considerar el problema de la escala, así como la no singularidad y la incertidumbre de los modelos geofísicos obtenidos y qué relación petrofísica específica es la más apropiada para el estudio realizado. Una vez analizado lo anterior, se pueden aplicar enfoques de integración y estimación que se centren en la definición de la distribución espacial y la magnitud en el sistema acuífero, como sería la geometría del acuífero, la geometría de las condiciones específicas de una parte del acuífero (casos puntuales o particulares dentro del acuífero).

El primer paso es obtener modelos geofísicos confiables para traducir los valores de distribución de las propiedades físicas en parámetros hidráulicos. El segundo paso es la conversión cuantitativa de la propiedad geofísica a propiedades hidrogeológicas o geológicas, a través de la construcción de mapas donde se utilicen las relaciones petrofísicas (por ejemplo unidades hidrogeológicas, transmisividades, conductividades hidráulicas, distribución de contaminantes), conocido como enfoque determinista; o bien, aplicando métodos estocásticos como la geoestadística para determinar el valor de la propiedad o parámetro hidrogeológico en un sitio donde no se cuenta con información puntual, conocido como enfoque probabilístico. La forma más general de integrar información y datos para problemas no lineales es aplicar métodos de inversión estocástica, en los que los parámetros de los modelos resultantes estén dados por una distribución de probabilidad. El peso probabilístico de cada elemento se considera en las inversiones iterativas posteriores para mejorar los modelos. (Falgás Parra, E., 2007).

Una parte importante en la integración de los datos geofísicos es la caracterización que se haya realizado del sitio a evaluar. Este punto conlleva al análisis de información de diferentes disciplinas y, en la medida que se tenga un mayor conocimiento se tendrá un mejor éxito exploratorio. Por otra parte, la decisión del problema a resolver no es de una sola persona, sino de un grupo de especialistas con diferente enfoque; sin embargo, debe existir un experto que conjunte y aproveche las habilidades de los especialistas y la intuición para combinar los conjuntos de datos hidrogeológicos y de la Hidrogeofísica.

Otra situación que debe tomarse en consideración es la asociación y cuantificación de los procesos de depósito de las unidades hidrogeológicas con la firma geofísica. Sobre esto, muchas de las relaciones que vinculan los parámetros hidrogeológicos (como el tamaño medio del grano, la porosidad, el tipo y la cantidad de fluido de poros) en las zonas cercanas a la superficie con los atributos geofísicos (como la velocidad, la resistividad eléctrica, cargabilidad, densidad, constante dieléctrica, susceptibilidad magnética, temperatura) no se conocen bien. La mayor parte de las investigaciones de la Hidrogeofísica se han realizado

para relacionar a la geofísica con la litología y su potencial para contener agua; o bien, conocer la distribución de una propiedad y relacionarla con la contaminación o intrusión marina. Poco o nada se ha realizado para evaluar las condiciones petrofísicas del medio hidrogeológico enfocado al comportamiento que presenta el ambiente sedimentario en función de la porosidad, presión y temperatura, donde el principio de Bernoulli relaciona la energía potencial, cinética y elástica, específicamente para evaluación de zonas con potencial para infiltrar agua, rehidratación de arcillas para estabilizar un terreno, control de taludes, frentes de avance en túneles para controlar la presión de agua en minas, entre otros.

Para los fines de este trabajo, se plantea sólo la integración convencional de correlacionar los resultados geofísicos con la litología para definir:

- El potencial hidráulico subterráneo.
- Delinear nubes de contaminación o intrusión marina.
- Determinar variación de propiedades en taludes donde el agua es el factor del movimiento o desplazamiento del terreno.
- Identificación de zonas arcillosas.

Todo lo anterior, se realiza únicamente correlacionando los resultados de la geofísica con una evidencia real (datos de perforación o contaminación).

En esta parte es importante caracterizar las diferentes unidades geoelectricas con las unidades geológicas en función de su capacidad para almacenar y ceder agua (porosidad y permeabilidad).

Capítulo VIII. Resultados

Como se ha venido expresando, los resultados que arroja la Hidrogeofísica son bases de datos, planos, secciones y perfiles, los cuales deben estar correlacionados con la información geológica e hidrogeológica disponible y como resultado final, es la propuesta de exploración directa para validar la información indirecta correlacionada. Esta situación trae como consecuencia orientar a realizar la exploración directa en los sitios donde:

- Se presenten mayores variaciones en los valores de las propiedades físicas calculadas. (anomalías).
- Las condiciones de la Hidrogeofísica presenten escenarios favorables o desfavorables, para encontrar un horizonte con potencial hidráulico, para realizar una perforación exploratoria.
- Identificar zonas con mayor o menor concentración de agua marina, para extraerla y darle el tratamiento para desalinizarla,
- Identificar estratos donde inyectar el agua de rechazo, producto de la desalinización.
- Identificar zonas contaminadas.
- Identificar acuíferos confinados o semiconfinados (geometría del acuífero).
- Asociar una propiedad Hidrogeofísica con un parámetro o propiedad hidrodinámica.

Los resultados deben ser claros y sobre todo estar seguro de que el éxito exploratorio tendrá un mayor porcentaje de acierto.

Los resultados deben presentarse en un texto donde se incluya:

1. **Introducción.** Necesidades de la exploración y evaluación Hidrogeofísica, objetivos y alcance de los resultados obtenidos, así como el planteamiento del problema geofísico a resolver.
2. **Marco físico de referencia.** Identificar y definir las condiciones geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del sitio evaluado; además de, precisar el nivel de caracterización del estudio geofísico. Incluye la revisión de bibliografía, estudios, referencias relacionadas con el tema o sitio de exploración a evaluar. Con base en el marco, plantear el tipo de exploración geofísica a realizar, tipo de arreglo eléctrico o de bobina, definido con base en el tipo de variación lateral, vertical o ambas; así como también la densidad de datos que se propusieron y tomaron para resolver el problema. Los textos deben contar con planos de localización, mapas geológicos, hidrológicos, georreferenciados y con letra legible (que se vea) cuando se impriman. Las figuras deben ser explícitas a la situación que se está describiendo, así como también deberán presentarse en tamaño y letra legible.
3. **Adquisición de datos.** En este punto es importante tener la georreferenciación de adquisición de datos (tanto en XY como en elevación). ¿Cómo se realizó la adquisición? ¿Problemática que presentó el sitio? Sitio donde se realizó la calibración y sus resultados. Un mapa con la ubicación de los sitios donde se realizaron las mediciones. Para el caso del TEM poner el *Track* o recorrido de la bobina y el punto de atribución en el centro de la bobina. Para el TER y SEV georeferenciar los puntos donde se colocaron los electrodos. Presentar una tabla con la ubicación de los sitios

de medición con el nombre del sondeo, coordenadas geográficas, coordenadas UTM y elevación. Sobre el último punto, aclarar si la ubicación se realizó con GPS de precisión o de mano.

Explicar la metodología de adquisición, ya sea a través de un diagrama o bien, una explicación breve y clara de cómo se obtuvieron los datos de la Hidrogeofísica.

Es importante indicar el tipo de equipo de adquisición y las características técnicas (marca, modelo, capacidad), ya que será un elemento de apoyo en la toma de decisiones sobre la calidad de la información, específicamente para definir la profundidad de la exploración.

Indicar el tipo de archivo en que se grabó la información Hidrogeofísica.

4. **Procesamiento.** En esta parte es importante definir qué tipo de análisis se le aplicó a la señal obtenida, específicamente enfocado a la eliminación de ruido y resaltar la señal natural del medio y los resultados que se obtuvieron en cuanto a cantidad de imágenes, perfiles y mapas.

Explicar en forma de diagrama lo que se realizó.

En esta parte se deben incluir los resultados individuales e integrados de las mediciones realizadas; así como, las bases de datos que se generaron, indicando el tipo de archivo que corresponde.

5. **Interpretación.** Describir con claridad la ubicación de los sitios medidos (SEV, TER, TEM) y las variaciones que presenta la distribución de las mediciones geofísicas en valores puntuales, perfiles o mapas.

En esta descripción se debe hacer tanto a los datos de campo crudos o filtrados, así como a los cortes geoeléctricos (unidimensionales, perfiles o mapas) obtenidos del procesamiento de los datos.

En esta situación hay que definir, con base en los contrastes de la propiedad medida, unidades geoeléctricas, las cuales representen un comportamiento uniforme o similar del medio medido.

6. **Integración.** Correlacionar la información Hidrogeofísica con alguna evidencia real (corte litológico de pozo, contaminante, posición del nivel del agua, conductividad hidráulica, contenido de humedad). En esta parte las unidades geoeléctricas (para el caso de este trabajo) pueden asociarse varias en una sola unidad geológica o hidrogeológica.

Determinar el grado de variación que se presenta entre los valores obtenidos de la Hidrogeofísica y las evidencias reales que se tengan de la zona evaluada.

7. **Resultados.** Plantear las acciones a seguir con base en los resultados obtenidos como: perforación directa, ampliación de la exploración realizada; así como también, describir si se cumplió el o los objetivos, así como los alcances planteados.

Para la entrega del documento escrito que se haga del estudio se plantea el siguiente índice:

Resumen ejecutivo

Capítulo 1. Generalidades

- 1.1. Introducción
- 1.2. Objetivo

Capítulo 2. Marco físico de referencia

- 2.1. Información existente
- 2.2. Marco físico de referencia
 - 2.2.1. Localización de la zona de estudio
 - 2.2.2. Orografía
 - 2.2.3. Hidrología
 - 2.2.4. Clima, precipitación y temperatura
- 2.3. Marco geológico
 - 2.3.1. Fisiografía
 - 2.3.2. Geomorfología
 - 2.3.3. Geología regional
 - 2.3.4. Geología del subsuelo
- 2.4. Marco hidrogeológico
 - 2.4.1. Disponibilidad
 - 2.4.2. Situación administrativa del acuífero, decretos de veda
 - 2.4.3. Información hidrogeológica disponible de la zona

Capítulo 3 Metodología

- 3.1. Proceso para desarrollar el proyecto
- 3.2. Recopilar y analizar información
- 3.3. Verificar la geología e hidrogeología
- 3.4. Medir propiedades de las rocas
- 3.5. Análisis de resultados, integración y dictamen

Capítulo 4. Exploración geofísica

- 4.1. Localización de los sondeos SEV, TEM o líneas de TER
- 4.2. Interpretación
- 4.3. Asociación geológica - geofísica

Capítulo 5 Dictamen

Referencias

Anexos

- Anexo 1. Archivo de información geofísica de campo (en disco magnético).
- Anexo 2 Memoria fotográfica.
- Anexo 3 Modelos unidimensionales obtenidos de la exploración geofísica.
- Anexo 4. Perfiles y secciones geofísicas.
- Anexo 5. Bases físicas de los métodos geofísicos empleados.
 - A5.1. Generalidades del método o métodos empleados
 - A5.1.1. Parámetro físico de interpretación
 - A5.1.2. Arreglo geométrico utilizado
 - A5.1.3. Procesamiento de los datos
 - A5.2. Equipos utilizados
- Anexo 6. GPS (datos georreferenciados)

Anexo 7. Referencias que sustentan el trabajo realizado (artículos, mapas, estudios).

Anexo 8. Organización de la información recopilada y obtenida en el estudio (en disco o nube). Es importante describir el tipo de archivos que se generaron en el estudio y el software que se utilizó. En las **Figuras 8.1** se muestran algunas de las muchas formas de presentación de los datos en que puede entregarse la información.

Responsable de la ejecución del trabajo

Actividad	Proceso	Tipo de archivo	Software o captura
Recopilación de información	Artículos (material de apoyo)	*.pdf	Acrobat
		*.doc	Word office
		*.pptx	PowerPoint office
	Base de datos	*.xls	Excel Office
Geofísica de campo	Adquisición de datos de capo TEMS	*.BIN, *.usf	TERRATEM
	Geoposicionamiento de los TEMs (localización de puntos para verse en Google Earth)	*.gtm *.klm *.kmz	Trade Maker Google Earth
	Ubicación de TEMs para procesado y elaboración de mapas	*.xls	Excel Office 2007
	Fotografías de los TEMS	*.jpg	PowerPoint,
	Imágenes procesadas	*.bmp	Word, Office 2010
Geofísica de gabinete	Procesado de TEMs	*.Tem	TERRATEM
	Base de datos de TEMS	*.wdb	Winglink
	Secciones y mapas	*.srf *.bmp	Surfer 12
	Resultados de los TEMS	*.pptx	PowerPoint, Office 2010
Redacción capítulos	Textos	*.doc	Word office
	Figuras	*.ppt	2010 Power Point, Office 2010

Figura 8.1 (a) Forma 1

INFORMACION > EstudiosFAJR > 2018 > 036_Lerma-TER > LERMA

Nombre	Fecha de modificación	Tipo
AA Texto	30/11/2018 11:45 a. m.	Carpeta de archivos
Anexo 1 (datos de campo)	30/11/2018 11:45 a. m.	Carpeta de archivos
Anexo 2 (Memori forográfica)	29/11/2018 07:03 p. m.	Carpeta de archivos
Anexo 3 Modelos geoelectricos	30/11/2018 11:39 a. m.	Carpeta de archivos
GPS	30/11/2018 11:38 a. m.	Carpeta de archivos

H:) > INFORMACION > EstudiosFAJR > 2018 > 036_Lerma-TER > LERMA > Anexo 1 (datos de campo)

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
L1	28/11/2018 01:57 p. m.	Archivo DAT	11 KB
L2	28/11/2018 05:48 p. m.	Archivo DAT	8 KB
L3-1	28/11/2018 01:58 p. m.	Archivo DAT	7 KB
L3W	28/11/2018 01:57 p. m.	Archivo DAT	7 KB
Datos campo TER-Lerma	30/11/2018 10:29 a. m.	Archivo WinRAR	237 KB
L1WS-1A	28/11/2018 04:56 p. m.	Hoja de cálculo de Microsoft Excel	50 KB
L1WS-6Abueno	28/11/2018 05:22 p. m.	Hoja de cálculo de Microsoft Excel	48 KB
L3-1W	28/11/2018 05:27 p. m.	Hoja de cálculo de Microsoft Excel	35 KB
L3-1WS	28/11/2018 05:05 p. m.	Hoja de cálculo de Microsoft Excel	35 KB
L3WS-6	28/11/2018 05:10 p. m.	Hoja de cálculo de Microsoft Excel	35 KB

sFAJR > 2018 > 036_Lerma-TER > LERMA > Anexo 3 Modelos geoelectricos > Archivos procesados >

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Arreglo Wenner ganancia 1	30/11/2018 11:38 a. m.	Carpeta de archivos	
Arreglo Wenner ganancia 6	30/11/2018 11:38 a. m.	Carpeta de archivos	
Arreglo Wenner-Schlumberger ganancia 1	30/11/2018 11:39 a. m.	Carpeta de archivos	
Arreglo Wenner-Schlumberger ganancia 6	30/11/2018 11:39 a. m.	Carpeta de archivos	

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 L1WS-6crudo	28/11/2018 05:50 p. m.	Archivo DAT	8 KB
 L1WS-6crudo_modreslog	28/11/2018 06:48 p. m.	Archivo DAT	17 KB
 L1WS-6crudo_modreslog_post	28/11/2018 06:48 p. m.	Archivo DAT	3 KB
 L1WS-6filtrado	28/11/2018 05:51 p. m.	Archivo DAT	9 KB
 L1WS-6filtrado_modreslog	28/11/2018 06:51 p. m.	Archivo DAT	17 KB
 L1WS-6filtrado_modreslog_post	28/11/2018 06:51 p. m.	Archivo DAT	3 KB
 L1WS-6crudo	28/11/2018 05:38 p. m.	Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel	8 KB
 L1WS-6filtrado	28/11/2018 05:37 p. m.	Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel	9 KB
 L1WS-6crudo.INV	28/11/2018 06:47 p. m.	Archivo INV	311 KB
 L1WS-6filtrado.INV	28/11/2018 06:50 p. m.	Archivo INV	339 KB

Figura 8.1 (b) Forma 2

Responsable de la integración del estudio. Es importante, independientemente de la empresa que realice el estudio, indicar quién o quiénes fueron los responsables del trabajo desarrollado, para lo cual será necesario incluir la o las Cédulas Profesionales de los responsables técnicos de los trabajos, incluyendo una nota en la que se indique:

“Copia fiel de mi cédula profesional que valida el trabajo” Estudio (nombre)

Para

Cliente

Nombre del responsable

Firma

Capítulo IX. Lineamientos para realizar estudios de Hidrogeofísica

9.1. Introducción

Durante muchos años, las técnicas de exploración geofísica han demostrado ser herramientas eficientes en la exploración de aguas subterráneas, no solo en la detección directa de la presencia de agua, sino también en la estimación del tamaño, las propiedades del acuífero y la calidad de las aguas subterráneas.

Por lo anterior, se plantea el término Hidrogeofísica como el desarrollo de metodologías geofísicas orientadas a la exploración y evaluación de las propiedades, estructuras y procesos hidrogeológicos cuyos objetivos están orientados a: detectar la posición, extensión y volumen potencial de agua de los acuíferos; ubicar fallas y zonas de fractura; detectar interfases de agua dulce/salina; estimar la profundidad del nivel freático o estático; detectar o rastrear la contaminación de aguas subterráneas; identificar acuitardos y conexiones entre diferentes acuíferos. Así como también, a través de la información de perforaciones y pruebas de bombeo, estimar la porosidad, permeabilidad y transmisividad de un acuífero.

En México, para la ejecución de estudios de localización de fuentes de abastecimiento de agua o de factibilidad hidrogeológica se solicita de un estudio que indique si el sitio donde se requiere una obra de captación de agua subterránea presenta las condiciones hidrogeológicas suficientes y necesarias para llevar a cabo la investigación directa. A la fecha este tipo de estudios se realiza sólo para cumplir un requisito, no oficial, al no existir una norma o lineamiento que especifique por qué realizarlo y qué elementos técnicos mínimos debe contener. Al respecto, en la mayoría de las veces se asocia al estudio de la Hidrogeofísica como el elemento de decisión para definir si el sitio presenta o no condiciones favorables; sin embargo, éste es sólo una parte del proceso de factibilidad hidrogeológica, **Tabla No. 9.1.** (Mora Herrera, L.J., 2010).

En lo relativo a la Hidrogeofísica, el subproceso debe considerar también los siguientes elementos, **Tabla No. 9.2.**

En cuanto a los métodos que se aplican en la investigación del agua subterránea, prácticamente todos se pueden aplicar; algunos muestran más éxito que otros. Sin embargo, los métodos eléctricos y electromagnéticos han demostrado ser particularmente más resolutivos, ya que muchas de las propiedades de formación geológica que son críticas para la hidrogeología, como la porosidad y la permeabilidad de las rocas, pueden correlacionarse con la conductividad eléctrica.

Hasta ahora una de las bondades de la exploración geofísica es que ha sido utilizada como una herramienta para el mapeo de recursos de aguas subterráneas o, como una herramienta de caracterización de la calidad de agua en el subsuelo. Hay que mencionar que, por ejemplo, en el mapeo del recurso hidráulico subterráneo, **no es el agua subterránea en sí misma el objetivo de la geofísica, sino la situación geológica en la que se presenta el agua.**

Tabla 9.1. Proceso de factibilidad hidrogeológica

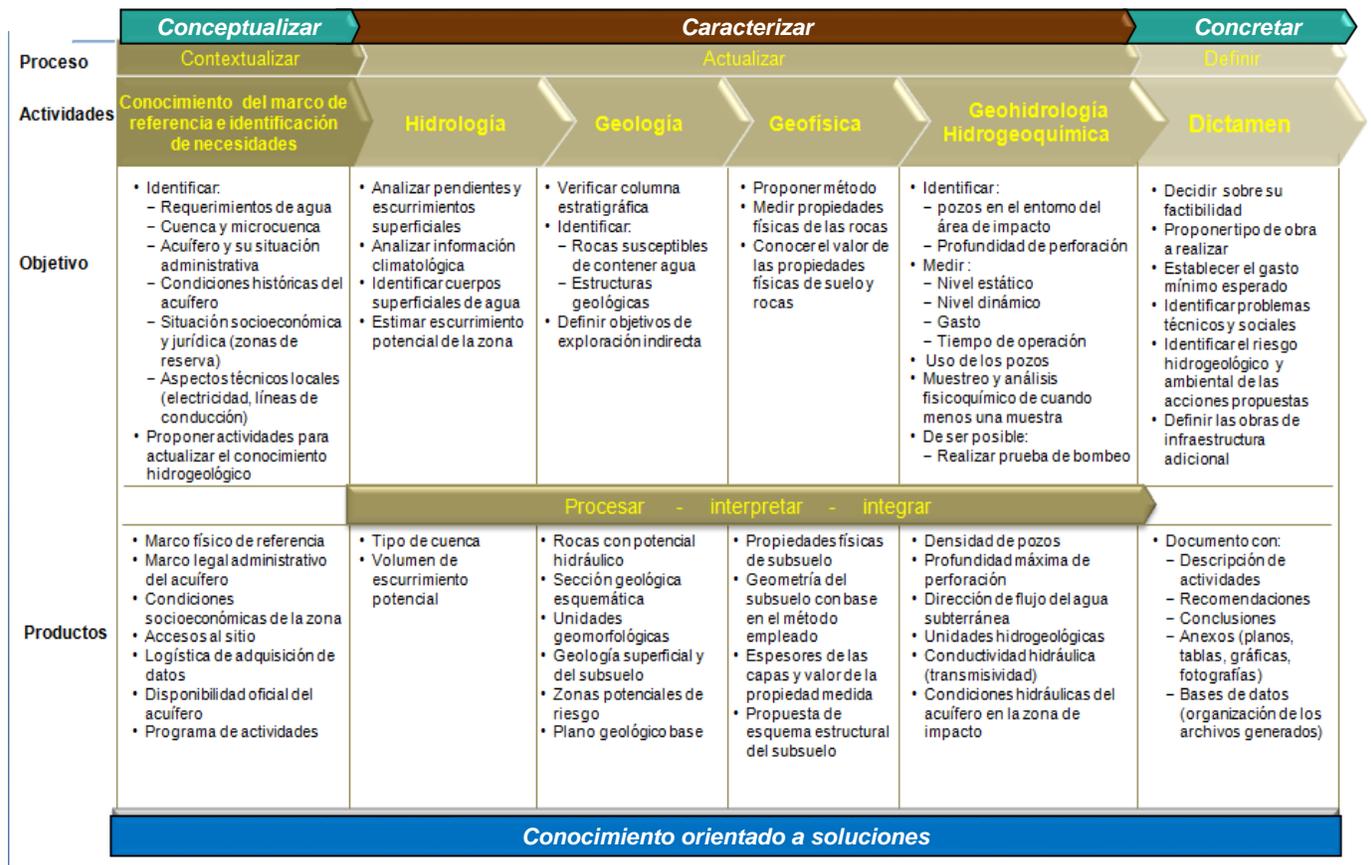


Tabla 9.2. Subproceso de exploración Hidrogeofísica



En cuanto a la aplicación de los métodos de campo potencial como gravedad y magnetismo, se han utilizado para mapear acuíferos regionales y las características de la cuenca a gran escala (por ejemplo, la gravimetría del valle de México); en particular el método magnético se ha usado para determinar áreas con potencial hidráulico similares que no han sido explotadas (Reséndiz O., P.A., 2015). Los métodos sísmicos de reflexión se utilizan hoy en día para identificar estructuras, en rocas volcánicas, asociadas a fracturamiento que puedan contener agua (por ejemplo, los estudios sísmicos en el valle de México, Pérez Cruz, G.A., 1986, COMESA, 2018)). Otra de las aplicaciones que plantea la Hidrogeofísica es la de proveer y asociar parámetros para la modelación hidrogeológica, la factibilidad hidrogeológica y contaminación de aguas subterráneas.

Para estos lineamientos no se habla de los métodos a nivel local o de laboratorio (registros de pozos, entre otros, Capítulo 1.2).

Se recalca que la interpretación de la información que proporcionan los diferentes métodos depende del conocimiento de la situación geológica e hidrogeológica que se presenta en cada lugar.

Por otra parte, cabe mencionar que muchas instituciones plantean en sus Términos de Referencia una metodología que, si bien se adapta al planteamiento que se hace en este trabajo y a sus necesidades particulares (CONAGUA, CEA-Nayarit, CEAG-Guanajuato y otros organismos operadores de agua); sin embargo, no existe un lineamiento general unificado.

El uso de la geofísica hoy en día está encaminado a reducir la incertidumbre y a incrementar el éxito exploratorio.

Los lineamientos que se proponen en este trabajo se enfocan a estudios de exploración geofísica aplicados a la hidrogeología (Hidrogeofísica), con el objeto de normalizar las actividades de planeación, adquisición de datos, procesamiento, integración y definición de resultados, así como de las medidas de seguridad que deben tomarse en cuenta en lo relativo al medio ambiente y del personal que realiza los trabajos de campo.

Es necesario también, establecer un periodo de vigencia de estos lineamientos y llevar a cabo una revisión y actualización de las metodologías que se aplican, dado el avance acelerado en el conocimiento de las técnicas de investigación indirecta que se aplican y desarrollan.

Estos lineamientos deberán, primero ser aprobados por una instancia colegiada en México o bien, por las asociaciones técnicas relacionadas con el tema, u organismos operadores de agua que demandan los servicios de exploración y evaluación de las condiciones hidrogeológicas y requieren de conocer qué es lo que se puede obtener de la Hidrogeofísica.

9.2. Objetivo

Establecer las disposiciones de carácter general y los requisitos mínimos necesarios que debe tener cualquier estudio de Hidrogeofísica en lo relativo a la exploración y caracterización del agua subterránea.

9.3. Campo de aplicación

Cualquier estudio hidrogeológico con nivel de caracterización superior a los 10¹ m o m².

9.4. Referencias

Ley de Aguas Nacionales, 2011, Comisión Nacional del Agua.

NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1996 y Modificación publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de noviembre de 2000.

NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de febrero de 1997.

NOM-004-CONAGUA-1996, Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1997.

NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua.

Diario Oficial de la Federación, 11-05-2017, LINEAMIENTOS para el otorgamiento de concesiones o asignaciones de agua subterránea salada proveniente de captaciones ubicadas en la proximidad del litoral.

9.5. Definiciones

9.5.1. Acrónimos

TEM o TDEM. (Transitorio electromagnético o *Time Domain Electromagnetic Method*) Sondeo electromagnético en el dominio del Tiempo.

SEV. Sondeo Eléctrico Vertical.

TER. Tomografía eléctrica de resistividad.

GPR. (*Ground-Penetrating Radar*) Georadar.

TSR. Tendido sísmico de refracción.

MT. Magnetotelúrico.

SIG. Sistema de Información Geográfica.

9.5.2. Definiciones básicas

Acuífero. Formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (Ley de Aguas Nacionales, 2011).

Acuitardo. Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula a través de ella con dificultad.

Ambiente: Complejo de condiciones bióticas, climáticas, edáficas y de otro tipo que constituyen el hábitat inmediato de un organismo. Medio físico, químico y biológico de un organismo en un tiempo dado.

Apilamiento (*Stacking*). Indica el número de mediciones que deben hacerse por ventana para mejorar la calidad de una señal o dato geofísico.

Arreglo electródico. Posición de electrodos de corriente y potencial que se colocan en el suelo para obtener un voltaje y con base en la distribución de los electrodos obtener un factor geométrico.

Bobina. Forma geométrica, generalmente cuadrada, como se tiende el cable de medición para el método TEM.

Diferencia de potencial. Es el trabajo que hay que realizar para mover una carga de 1 coulombio de un punto a otro contra las fuerzas del campo; trabajo que hace el campo para mover una carga de un punto a otro.

Calibración. Conjunto de operaciones que tiene por finalidad determinar los errores de un instrumento para medir y, de ser necesario, otras características metrológicas. (NOM-045-SEMARNAT-2006).

Caracterizar. Determinar los atributos peculiares de algo, de modo que claramente se distinga de lo demás (Real Academia Española).

Conceptualizar. Organizar de modo sistemático un conjunto de elementos, poniendo de manifiesto sus características y relaciones esenciales.

Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$): Es el inverso de la resistencia de una solución al flujo eléctrico. La resistencia de una solución acuosa a la corriente eléctrica o a un flujo de electrones disminuye cuando la cantidad de iones aumenta. En agua pura la cantidad de sales disminuirá y con ello los iones aumentando la resistencia al flujo de electrones. La conductancia de un electrolito es el recíproco de la resistencia específica de una solución medida entre dos electrodos de 1 cm^2 de área a 1 cm de distancia. La temperatura afecta la conductividad incrementándose dos por ciento por grado centígrado. Los valores normales de conductividad están entre los 30 y 60 cm^{-1} los valores por debajo de este nivel indican oligotrofia o baja productividad, y valores por encima indican eutrofia o alta productividad.

Conductividad hidráulica. Capacidad del medio poroso para transmitir agua.

Contextualizar. Situar el entorno físico de lo que se está buscando.

Correlación. 1. La determinación de la equivalencia o contemporaneidad de eventos geológicos en áreas separadas. 2. Asociar información de diferentes disciplinas para compararlas y conocer el grado de congruencia que existe entre ellas.

Electrodo. Varilla de acero, cobre, bronce o tasa de cerámica porosa con solución de sulfato de cobre que se utiliza para inyectar corriente eléctrica (corriente) o medir voltaje (potencial).

Factibilidad hidrogeológica. Es una herramienta para guiar la toma de decisiones en la evaluación hidrogeológica encaminada a identificar las posibilidades de éxito o fracaso en la perforación de una fuente de abastecimiento de agua subterránea (incluye los aspectos técnicos, económicos y operacionales).

Gravimetría. Método geofísico que mide la diferencia de gravedad entre dos puntos observados. Donde la gravedad es la fuerza de atracción de un cuerpo hacia el centro de la tierra, o hacia cualquier otro cuerpo físico que tenga masa. Para la mayoría de los propósitos se aplican las leyes de la gravedad de Newton.

La presencia del campo gravimétrico es utilizada por la geofísica para detectar las variaciones verticales y laterales de las diferencias de densidades de las unidades geológicas en el subsuelo.

Hidrogeología: La hidrogeología es una rama de las ciencias geológicas que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación. Es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, etc.). Parte de la geología que se ocupa del estudio de las aguas dulces y en particular de las subterráneas y su aprovechamiento.

Interpretación. Proceso enfocado, desde el punto de vista de la Hidrogeofísica, a la descripción de las anomalías obtenidas del procesamiento de los datos geofísicos.

Mapa. Representación gráfica de la distribución en planta de una propiedad física, unidad geológica o hidrogeológica.

Modelo estático. Término utilizado para definir la estructura geológica donde se acumula el agua subterránea.

Modelo geoelectrico. Esquema de la variación de la resistividad en el subsuelo que se obtiene de la inversión de datos.

Nivel de caracterización local. Estudio de Hidrogeofísica donde el área o longitud del estudio se ubica entre 10^0 a 10^3 m o m².

Nivel de caracterización puntual o laboratorio. Estudio de Hidrogeofísica donde el área o longitud del estudio es menor de 10^1 m o m².

Nivel de caracterización regional. Estudios de Hidrogeofísica donde el área o longitud del estudio supera los 10^5 m o m² (se aplica principalmente geofísica aérea).

Nivel dinámico. Posición del agua en un pozo al ser bombeado a un caudal dado.

Nivel estático. Posición del agua en un pozo cuando no está afectado por el bombeo.

Nivel freático. Límite entre la zona de aireación y la de saturación. Este término se emplea solo en acuíferos libres.

Nivel piezométrico. Elevación que alcanza el agua en un pozo artesiano al conectar el acuífero con la atmósfera.

Normas Oficiales Mexicanas: Aquellas expedidas por "la Secretaría", en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización referidas a la conservación, seguridad y calidad en la explotación, uso, aprovechamiento y administración de las aguas nacionales y de los bienes nacionales a los que se refiere el Artículo 113 de la LAN (Ley de Aguas Nacionales, 2011).

Perfil, Presentación de resultados de datos (en dos dimensiones distancia-profundidad) de la Hidrogeofísica crudos, filtrados o con procesamiento.

Permeabilidad: Factor hidrogeológico que describe la capacidad de una unidad geológica de conducir flujos de agua subterráneos. La capacidad de un material de transmitir agua a través de sus poros al ser sometida a presión. Es la capacidad de transmisión de agua que tiene una roca. La permeabilidad puede ser primaria, producida por la porosidad de acoplamiento o por fracturas tectónicas abiertas, o secundaria, debida al agrandamiento por disolución de fisuras, que da lugar a la permeabilidad de los conductos. Propiedad de las rocas y del suelo de dejar pasar el agua a través de sus intersticios. Facilidad variable con la que el agua penetra en el suelo bajo la influencia de la gravedad; expresa por lo tanto la rapidez de la percolación.

Loop. También conocida como bobina. Este término se ocupa principalmente en el sondeo electromagnético TEM.

Perfilaje . Técnica que obtiene valores puntuales (bajo el centro de la bobina o arreglo de electrodos). Se utiliza para conocer variaciones laterales de la propiedad medida.

Petrofísica. Es el estudio de las propiedades físicas (texturales y distribución de poros) y químicas de las rocas y su interacción con fluidos.

Porosidad (suelo): La porosidad es una indicación del volumen total de espacios porosos discernibles con una lupa x20; se mide por horizonte y se registran los poros que contiene cada horizonte.

Pozo: Hoyo que se excava en la tierra hasta encontrar la capa de agua subterránea. Obra de ingeniería en la que se utilizan maquinarias y herramientas mecánicas para su construcción y que permite extraer agua del subsuelo, con fines de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, en sistemas públicos y privados (NOM- 230-SSA1-2002).

Proceso. conjunto de actividades o tareas, mutuamente relacionadas entre sí que admite elementos de entrada durante su desarrollo ya sea al inicio o a lo largo del mismo, los cuales se administran, regulan o autorregulan bajo modelos de gestión particulares para obtener elementos de salida o resultados esperados. Un proceso definido y ordenado, sustentado en un análisis con secuencias de actividades, entre las que se destacan la información disponible de diversas fuentes, la adquisición de datos en campo, la interpretación e integración, se facilita la toma de decisiones y se ahorran recursos económicos importantes.

Procesamiento. Proceso en el cual se elimina ruido o se resalta la señal Hidrogeofísica.

Profundidad de investigación o *Skin Depth* (para los estudios de TEM, MT y AMT). Es una medida de la penetración que un frente de onda electromagnética mantiene en un material.

Provincia fisiográfica: (provincia geomorfológica): Definida por su morfología y estructura geológica (criterios principales que se han aplicado para México), además de las climáticas, hidrografía, suelo y vegetaciones dominantes.

Recopilación de información. Proceso de recabar información específica sobre o del proyecto a realizar

Resistividad. Es una propiedad intrínseca de la materia que cuantifica el grado de oposición de un determinado material al paso de la corriente eléctrica. Su unidad es Ohm-m

Resistividad aparente. Es una relación de la ley de Ohm sobre el voltaje medido V , aplicado a una corriente I , multiplicado por una constante geométrica k , que depende en el arreglo de electrodos: $\rho_a = kV / I$. Su unidad es el Ohm-m.

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

Roll Alone. Término que se utiliza cuando la longitud del tendido geoelectrico a realizar supera la distancia del número de electrodos que se tiene para realizar la medición.

Ruido cultural. Variaciones en la medición de una señal electromagnética ocasionadas por líneas de transmisión de alta tensión, antenas de recepción de telefonía y televisión, motores en operación que se ubican en el entorno de la bobina que está adquiriendo información.

Sección geológica esquemática. Representación gráfica en dos dimensiones de la distribución y estructuras de las rocas que pueden presentarse en el subsuelo.

Tomografía eléctrica de resistividad: Método de resistividad multielectrodo cuyo objetivo específico es el de determinar la distribución lateral y vertical de la resistividad en el subsuelo

Turn Off. Tiempo que tarda la corriente del transmisor del equipo electromagnético TEM en llegar a cero. Esta situación se presenta en algunos equipos y ocurre en las primeras ventanas de adquisición donde hay presencia aún de la corriente del transmisor.

9.6. Especificaciones

9.6.1. Responsables y responsabilidades

Cualquier estudio de Hidrogeofísica debe ser realizado y validado por un ingeniero geofísico, cuya responsabilidad es el planteamiento, ejecución, procesamiento, correlación e integración de la información indirecta (Hidrogeofísica), que apoye en la caracterización del medio hidrogeológico que se esté estudiando. Debe estar en contacto directo con un ingeniero geólogo, hidrogeólogo o especialista en agua subterránea.

Cualquier estudio de Hidrogeofísica, *sólo en su etapa de adquisición de datos*, puede ser también realizado por un geofísico no titulado, o bien con operadores de equipo geofísico; en ambas situaciones, con experiencia de más de cinco años en adquisición de datos.

9.6.2. Generales

9.6.2.1. Las especificaciones planteadas en estos Lineamientos se deben aplicar en los estudios de Hidrogeofísica que se realicen para estudios de factibilidad hidrogeológica, evaluación de acuíferos, delimitación de intrusión marina, infiltración, movimiento del agua subterránea, perforación de pozos o conocimiento de la distribución de alguna propiedad o parámetro hidrogeológico; para el caso de contaminación si bien los métodos son similares, requiere de una mayor caracterización debido a que los fenómenos que se presentan en el subsuelo son más de tipo químico que físico, situación que debe tomarse muy en cuenta en el momento de decidir el tipo de método geofísico y medición a realizar.

El proceso que se plantea se considerará como el requerimiento mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos geofísicos, técnicas complementarias o alternos más complicados o precisos, cuando el objetivo de investigación lo requiera, en cuyo caso el contratante revisará y autorizará.

9.6.2.2. El estudio de Hidrogeofísica debe cumplir con todos los elementos que se plantean en la **Figura 9.1.**

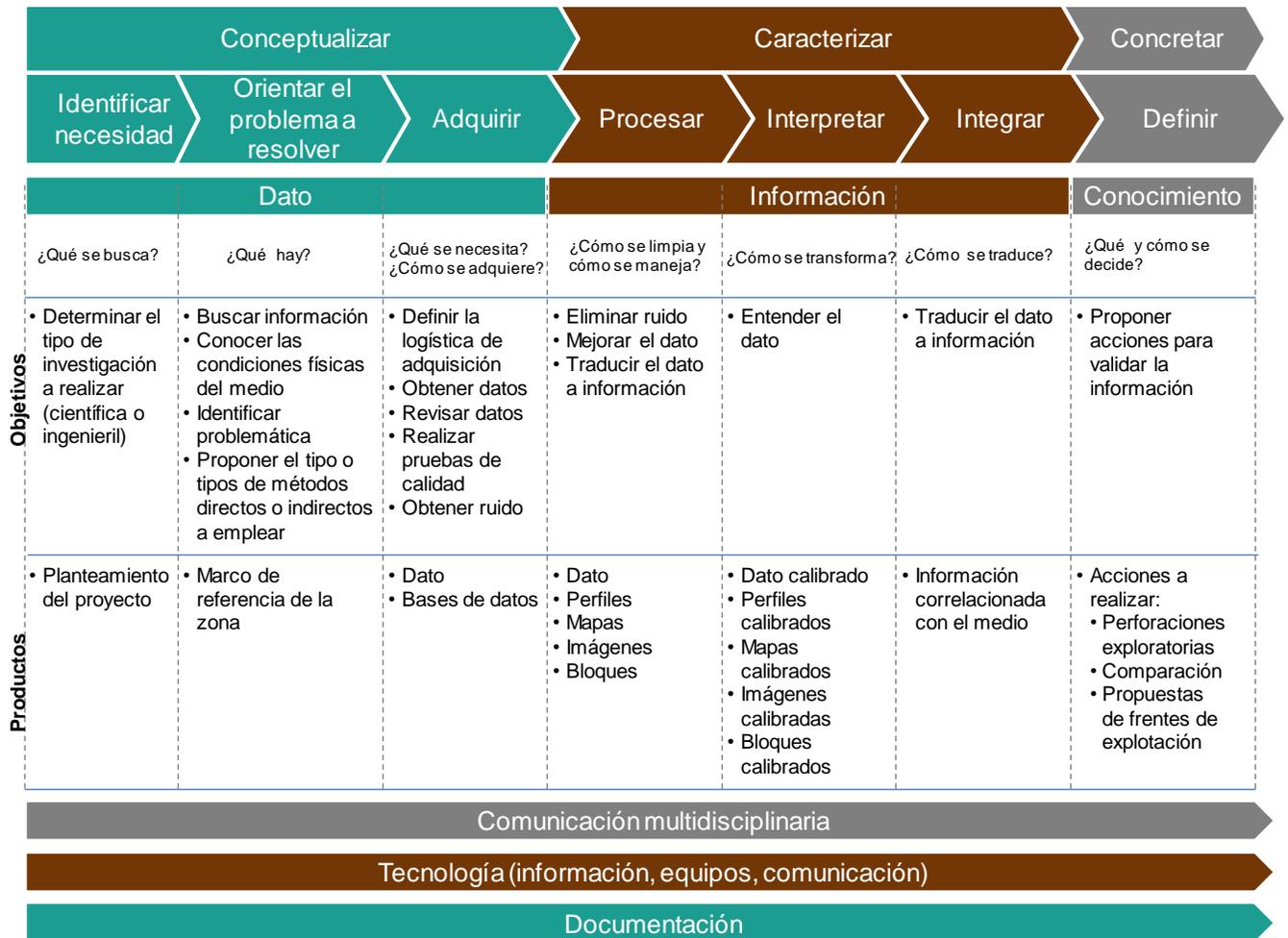


Figura 9.1. Proceso de exploración Hidrogeofísica (EXEVHI, 2015)

9.6.2.3. Para el planteamiento de la propuesta de Hidrogeofísica es necesario tomar en consideración el nivel de caracterización, **Figura 9.2**, para definir el grado de detalle que requiere el estudio (regional, local, puntual o laboratorio), tanto en extensión como a profundidad, considerando que hoy en día las exploraciones para agua se limitan, de manera general, a los 500 m y en contadas ocasiones llegan a los 2 000 m de profundidad.

9.6.2.4. Hay que asegurar que el estudio de Hidrogeofísica a realizar no esté dentro de los límites dispuestos por las declaratorias de áreas naturales protegidas y si es el caso, contar con la autorización de la instancia correspondiente y acatar las disposiciones que en materia ambiental indique la autoridad competente.

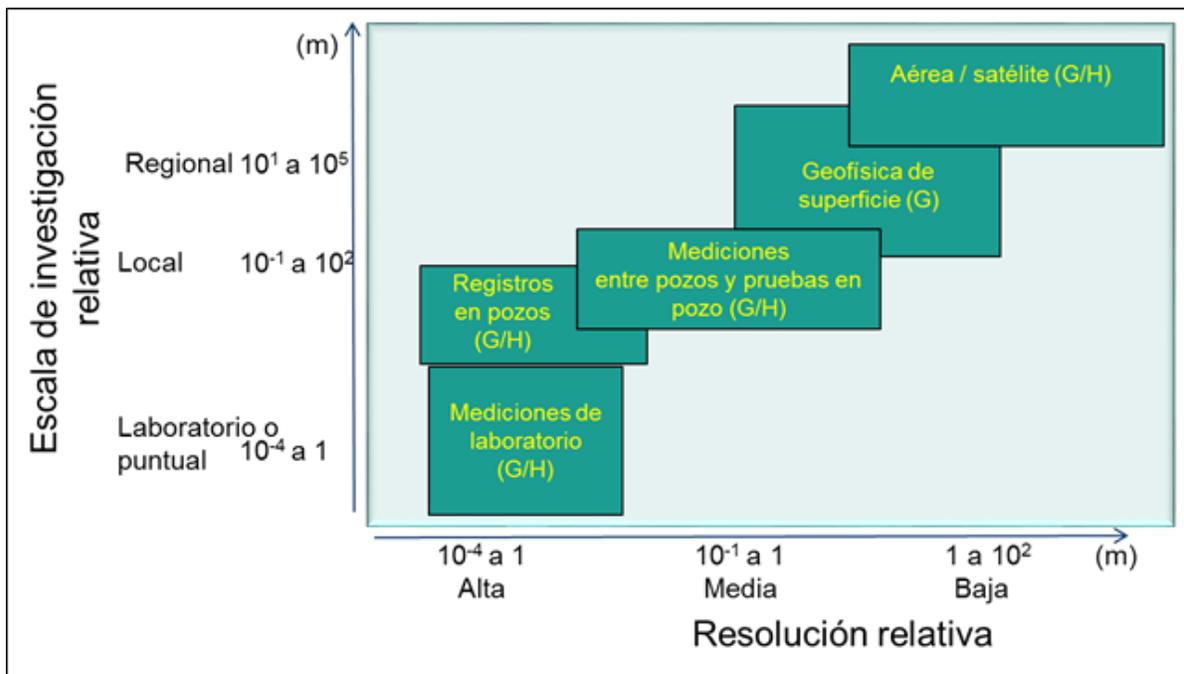


Figura 9.2. Nivel de caracterización de los estudios de la Hidrogeofísica

9.6.3. Identificar necesidad

9.6.3.1. Llevar a cabo una visita al sitio o, preguntar al cliente cuál es la necesidad de conocimiento en cuanto a las condiciones físicas del área a evaluar: profundidad de exploración, tipo de roca, estructura o contaminante a identificar, dimensiones del área a evaluar, condiciones topográficas del terreno, clima, vegetación, ubicación exacta del predio o área a evaluar, condiciones socioeconómicas del sitio, problemática social, información que tenga el cliente relacionada con el tipo de estudio a realizar.

9.6.3.2. Asegurar la integridad física del personal, en la zona, que realizará la exploración Hidrogeofísica.

9.6.3.2.1. *Condiciones topográficas, climatológicas y ambientales del sitio.* Deberá contar con ropa, zapatos e implementos como (transporte, guantes, casco protector, lentes y ropa adecuada al: clima, vegetación y fauna silvestre).

9.6.3.2.2. Situación social de la zona. Prever y prevenir problemas sociales en cuanto a la accesibilidad a los sitios donde se realizará la exploración. Para ello será necesario que el contratante gestione los permisos de accesibilidad a los sitios o bien, indique con qué persona en particular deberá hacer contacto la brigada de adquisición de datos.

9.6.4. Contextualizar

9.6.4.1. Buscar, recopilar, analizar y definir las condiciones topográficas, geológicas, hidrogeológicas históricas del área y en específico, del subsuelo con base en la información disponible, para tener un marco físico de referencia de la zona a evaluar.

9.6.4.2. Definir el marco físico de referencia del área a evaluar y proponer una sección geológica o hidrogeológica esquemática de las condiciones del subsuelo que se espera encontrar.

9.6.4.3. Identificar las necesidades de nuevo conocimiento enfocado a las propiedades físicas del subsuelo y del proyecto.

9.6.4.4. Definir el tipo de método y técnica geofísica a utilizar tomando en consideración los siguientes cuestionamientos:

- ¿El problema a resolver tiene una expresión Hidrogeofísica?
- ¿La variación de la propiedad Hidrogeofísica que se va a medir es lateral o vertical?
- ¿La señal que se va a medir es detectable?
- ¿El resultado será de utilidad?
- ¿La ejecución de estudio es factible?

9.6.4.5. Con base en punto anterior deberá tomarse en cuenta: la profundidad y dimensiones del objetivo y separación de mediciones; así como, el equipo de medición a emplear.

9.6.4.6. El equipo de adquisición debe ser de marca reconocida, con patente y que tenga la capacidad para realizar la investigación propuesta en cuanto a potencia y profundidad de investigación.

9.6.4.7. Proponer el programa de actividades a realizar.

9.6.5. Adquirir datos

9.6.5.1. Ubicación de los puntos, líneas o áreas a medir dependiendo del método y técnica geofísica.

9.6.5.2.1. Electromagnéticos (TEM)

9.6.5.2.1.1. Definir el arreglo de bobinas a emplear y sus dimensiones con base en el objetivo de exploración que se desee obtener.

9.6.5.2.1.2. Estimar la profundidad de investigación (*Skin Depth*) con base en el objetivo planteado. Tomar en cuenta el valor de resistividad esperada del sitio.

9.6.5.2.1.3. Asegurar en la planeación, que los sitios estén ubicados en línea recta y tratar que la separación entre los sitios sea lo más cercana posible para tener una buena continuidad lateral.

9.6.5.2.1.4. Determinar la separación de las bobinas. Dependiendo del tipo de investigación regional o de detalle se definirá la separación de las bobinas. Para el caso de mayor detalle se podrá proponer un perfilaje el cual deberá considerar una línea recta y una sobreposición de bobinas de, al menos, 50%.

9.6.5.2.1.5. Seleccionar el equipo de medición a emplear. Deberá ser de marca y patente, con la suficiente potencia para obtener el objetivo de profundidad de investigación propuesto.

9.6.5.2.1.6. Seleccionar la serie de tiempo de adquisición de datos a emplear con base en la profundidad de investigación a realizar. Cada equipo tiene un menú de series de tiempo a elegir. Hay que considerar que por la profundidad estándar de medición en los estudios de Hidrogeofísica, los tiempos de adquisición oscilan entre los 100 y 200 milisegundos

9.6.5.2.1.7. Seleccionar el tipo de cable a emplear para los fines de la investigación a realizar (entre más delgado será mayor la resistencia). En algunos equipos la resistencia del cable limita la operación del equipo.

9.6.5.2.1.8. Asegurar, en el momento del tendido del cable, que quede pegado lo más cercana al suelo, para evitar ruido por viento; dependerá de las condiciones del terreno.

9.6.5.2.1.9. Ubicar con GPS la esquina de la bobina donde se colocará el equipo y hacer el recorrido del tendido (*Track*) de la bobina, para determinar el área efectiva de medición que se utilizará en la etapa de procesamiento de la señal.

9.6.5.2.1.10. Seleccionar el filtro de 60 Hz o 50 Hz (Para México es el de 60 Hz).

9.6.5.2.1.11. Asegurar que el *Turn Off* sea lo más corto posible. En algunos equipos hay que seleccionarlo; en otros lo da por hecho.

9.6.5.2.1.12. Asegurar realizar una medición en algún sitio donde se cuente con un pozo para calibrar la información, al inicio de la campaña de medición; sino existe, basarse en la propuesta que se tenga del punto 9.6.4.2; además, realizar varias mediciones cambiando la ganancia y las ventanas de medición; al término de las mediciones seleccionar la ganancia y número de ventanas a medir.

9.6.5.2.1.13. En cada sitio, realizar el mayor número de mediciones posible. El tiempo de adquisición de datos depende del arreglo y serie de tiempo empleada; en algunos equipos la adquisición es más ágil. El número de mediciones a realizar se considera que sea en función del tiempo (de 30 a 60 minutos). Cabe recalcar, que todas las mediciones deberán realizarse con los mismos parámetros de adquisición (serie, ventanas y ganancia).

9.6.5.2.1.14. Al inicio o final de la medición obtener una señal de ruido, cuando el equipo proporcione dicha señal.

9.6.5.2.2. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

9.6.5.2.2.1. Estimar la profundidad de investigación utilizando un modelo computacional que permita, con base en el modelo geológico esquemático propuesto (inciso 9.6.4.2.) y con resistividades inferidas, definir la abertura máxima AB que deberá tener la medición, así como el número de lecturas de AB que deberán realizarse en cada sitio, para asegurar la profundidad de investigación.

9.6.5.2.2.2. Determinar el tipo de arreglo electródico a emplear con base en la disponibilidad del terreno para realizar las mediciones y la profundidad de investigación (Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Axial, Radial u otro).

9.6.5.2.2.3. Definir la capacidad del equipo de medición transmisor y receptor, a emplear, con base en la profundidad de investigación y las condiciones resistivas de la primera capa. En caso de usar un equipo multielectródico adaptar el equipo a las condiciones de medición.

9.6.5.2.2.4. El equipo de medición deberá ser de marca y patente, con la suficiente potencia para obtener el objetivo de profundidad de investigación propuesto.

9.6.5.2.2.5. Revisar los electrodos de medición que pueden ser de: acero, cobre, bronce; o bien, electrodos porosos de cerámica (tasas) donde se vierta sulfato de cobre líquido, queden bien enterrados al suelo. Asegurar que los electrodos tengan las mismas características para la medición a realizar.

9.6.5.2.2.6. Colocar, antes de realizar las mediciones, los electrodos de potencial; las aberturas MN dependerán de los resultados del modelo de predicción realizado. El fin de colocarlos es reducir el ruido y que se establezca el potencial eléctrico que se genera al momento de enterrar el electrodo en el suelo. En caso de que el suelo sea altamente resistivo se puede humedecer el sitio de los electrodos de voltaje y corriente con agua con sal o agua con sulfato de cobre; o bien, usar tasas porosas.

9.6.5.2.2.7. Obtener para cada abertura AB cuando menos cinco lecturas (corriente y voltaje), para obtener un valor promedio del sitio.

9.6.5.2.2.8. Intentar en cada medición y separación de electrodos de corriente, inyectar la misma cantidad de corriente eléctrica.

9.6.5.2.2.9. Estar al pendiente que los valores de caída de potencial entre mediciones no superen los límites de medición mínima del receptor. En caso de estar cerca del límite inferior realizar el empalme. Esta situación deberá preverse en la planeación de la medición.

9.6.5.2.2.10. Realizar al menos una medición de calibración en un sitio donde se conozcan las condiciones del subsuelo; de preferencia un pozo que se conozca su profundidad total y profundidad al nivel estático; en el caso de zonas contaminadas, realizar una medición en un sitio donde se esté seguro

de que no presenta contaminación (aguas arriba de la dirección del flujo de agua subterránea).

9.6.5.2.2.11. Geoposicionar el centro del sondeo y la posición de las aberturas AB y MN para que en la etapa de procesamiento se consideren los datos reales y no los de diseño.

9.6.5.2.2.12. Calcular el valor de resistividad aparente y graficar los resultados de resistividad-abertura AB/2 en papel bilogarítmico para llevar el control de calidad de los datos medidos. Para ello deberá calcularse el Factor Geométrico del arreglo propuesto. **Tabla 9.3**

Tabla 9.3 Ejemplo de un SEV, arreglo electródico Schlumberger y abertura AB =3 000 m (Los valores que se encuentran en las columnas MN corresponden al Factor Geométrico)

Factor Geométrico												
AB/2	MN			2			20			80		
	2	20	80	i	vp	ra	i	vp	ra	i	vp	ra
3	12.566			1800	12700	88.66						
5	37.699			2300	5600	91.79						
7	75.398			1700	1940	86.04						
10	155.509			1400	629	69.87						
15	351.858			1450	227	55.08						
20	626.748			1900	118	38.92						
30	1,412.146			1950	46.2	33.46						
40	2,511.703			1950	24.3	31.30						
50	3,925.420			2000	16.8	32.97						
70	7,695.331			1800	8.5	36.34						
85	11,347.433	1,119.192		1500	5.1	38.58						
100	15,706.392	1,555.088		2600	6.77	40.90	2600	68.5	40.97			
125	24,542.122	2,438.661		1975	3.68	45.73	2050	38.1	45.32			
150	35,341.347	3,518.584		2400	3.29	48.45	2400	33.4	48.97			
200	62,830.282	6,267.477					1600	12.1	47.40			
250	98,173.200	9,801.769					1950	8.6	43.23			
300	141,370.099	14,121.459					2400	6.16	36.25			
400	251,325.841	25,117.033	6,220.353				2300	2.85	31.12	3000	15.05	31.21
500	392,697.511	39,254.200	9,754.645				3000	2.44	31.93	3000	9.81	31.90
600	565,485.107	56,532.960	14,074.335				3000	1.42	26.76	3000	5.6	26.27
750	883,571.363	88,341.585	22,026.491							2000	2.08	22.91
1000	1,570,794.756	157,063.925	39,207.076							2000	1.1	21.56
1200	2,261,945.140	226,178.963	56,485.836							2000	0.65	18.36
1500	3,534,290.164	353,413.466	88,294.462							1800	0.32	15.70

9.6.5.2.3. Tomografía Eléctrica de Resistividad (TER)

9.6.5.2.3.1. Definir el arreglo electródico a utilizar con base en el detalle, lateral o a profundidad, que requiera la investigación. Para ello será necesario tomar en consideración lo expresado en el inciso 9.6.3.2.

9.6.5.2.3.2. Definir los niveles de investigación con base en la longitud total del tendido. Hay que recordar que a medida que la separación de electrodos de corriente es mayor y la separación de electrodos de voltaje pequeña, la medición del voltaje decrece. Sobre este punto es necesario considerar la potencia del equipo de adquisición (transmisor y receptor).

9.6.5.2.3.3. Diseñar que el arreglo electródico propuesto considere las dimensiones esperadas de los cuerpos a identificar en el subsuelo (cavidades, fallas, zonas saturadas, cuerpos resistivos).

9.6.5.2.3.4. Considerar que si se requiere de un mayor detalle entre niveles (mejor resolución lateral y a profundidad), hacer los ajustes necesarios en el programa de adquisición de datos.

9.6.5.2.3.5. Considerar que el equipo de medición sea de marca y patente, con la suficiente potencia para lograr el objetivo de profundidad de investigación propuesto.

9.6.5.2.3.6. Asegurar que los electrodos de corriente y potencial queden bien enterrados en el suelo a la profundidad donde la varilla metálica (acero, cobre o bronce) o bien, el electrodo de cerámica porosa presente estabilidad eléctrica.

9.6.5.2.3.7. Georreferenciar todos los electrodos (x,y,z).

9.6.5.2.3.8. Asegurar que el tendido, para el caso de ser una línea, sea lo más recto posible; en caso de utilizar otro tipo de arreglo electródico radial, azimutal o en L, tomar en cuenta que las líneas sean lo más rectas posibles.

9.6.5.2.3.10. Realizar una medición de prueba, con la mínima ganancia y revisar que todos los electrodos sean medibles y tengan continuidad eléctrica. En caso de presentar problemas de medición (valores negativos o anómalos), revisar los electrodos que estén bien conectados (enterrarlos más, humedecerlos con sulfato de cobre o agua salina). En algunos equipos puede verse en pantalla el comportamiento de las mediciones; si no, utilizar el *software* de interpretación para observar las anomalías generadas por que los electrodos no estén bien conectados. En situaciones donde el suelo esté flojo tratar de colocar el electrodo en una zona más firme que se pueda encontrar sin alejarse más de medio metro a la línea que se está midiendo y cuando el suelo sea altamente resistivo colocar un poco de agua con sal o solución de sulfato de cobre para que se tenga un mejor contacto electrodo.

9.6.5.2.3.11. Aplicar la ganancia, apilamiento acorde a la calidad de datos que se desee obtener. Considerar el inciso 9.6.4.2.

9.6.5.2.4.12. Asegurar que la calidad de los datos sea buena. **Figura 9.4.**

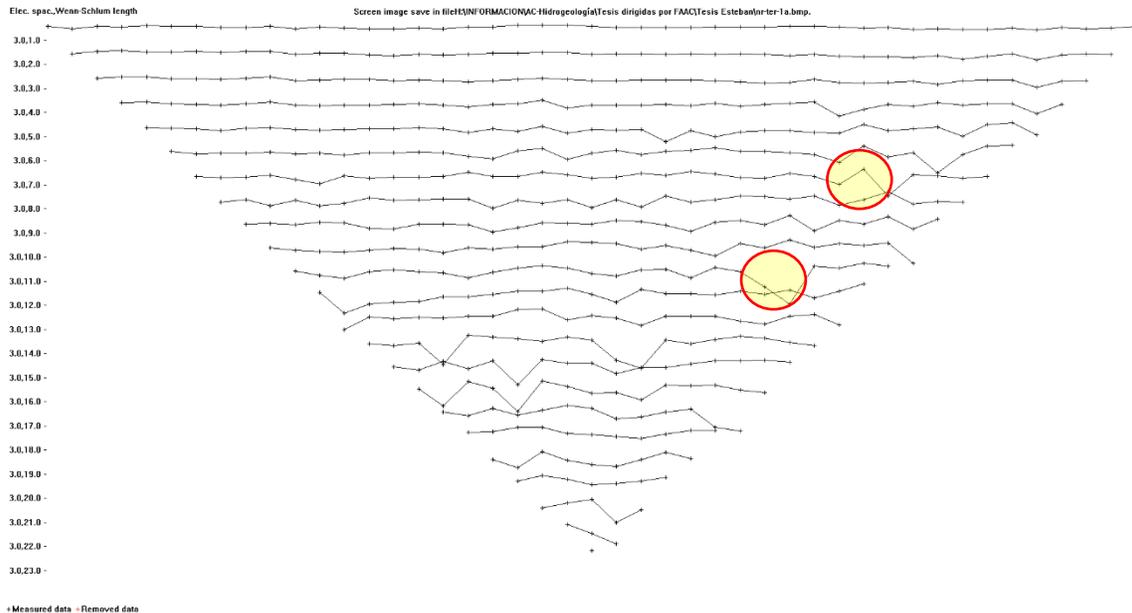


Figura 9.4 Ejemplo de una señal ruidosa y donde no hay continuidad en los datos (círculo rojo). Señal que requiere de más apilamiento.

9.6.5.3. Revisar la calidad de los datos ya sea de manera manual o gráfica; o bien, automatizada, al término de la adquisición de datos, para asegurar que los rangos de mediciones estén dentro de un límite y de que todos los datos en las mediciones que se obtuvieron (por ejemplo, en el TER donde algunas veces no se obtienen datos, o se obtiene un dato que varía muy fuerte en relación con el comportamiento medio de los datos). En este caso será necesario repetir la adquisición de los datos.

9.6.5.4. Grabar los datos obtenidos en formatos ya sea el del equipo de adquisición o convertirlos a un formato que sea fácil de leer por el software que se tenga para realizar el procesamiento de los datos. Existen diversos formatos para guardar la información obtenida.

Tabla 9.4

Tabla 9.4. Formatos de datos generados por los equipos de adquisición de datos

Formato	SEV	TER	TEM
Equipo de medición	X	X	X
*.xls	X		
*.txt	X	X	X
*.csv	X	X	
*.dat	X	X	X
*.2dm		X	
*.sir			X
*.bin			X
*.tem			X
*.usf			X
*.xyz			X

9.6.6. Procesamiento

Sobre este punto en el capítulo 5 se detallan las acciones que deben realizarse a la información obtenida en campo a través de los métodos SEV, TER o TEM.

9.6.6.1. Convertir los archivos que generan los diferentes equipos de adquisición de datos (SEV, TER, TEM) a formatos que van a ser utilizados por los diferentes softwares de procesamiento.

9.6.6.2. Revisar los datos de campo y recalculan los valores de campo a las condiciones reales (espaciamiento entre electrodos, tamaño de bobina).

Para SEV o TER recalculan el valor de resistividad con base en la posición correcta de los electrodos lo cual involucra obtener los Factores Geométricos Verdaderos, así como considerar la elevación topográfica. Tomar en consideración los puntos propuestos en los incisos 5.3.3 y 5.3.4 del capítulo 5.

Para TEM considerar el valor real del área de la bobina, serie de tiempo, corriente eléctrica inyectada, arreglo de bobina, Turn Off.

9.6.6.3. Revisar la calidad de los datos a través de un análisis estadístico (media, mediana, desviación estándar).

9.6.6.4. Aplicar filtrado a las señales para eliminar ruido. Dependiendo del tipo de método y señal, utilizar los más convenientes. (En la Tabla 5.2 se muestran los tipos de filtros y procesamientos que se aplican a las señales geofísicas).

9.6.6.5. Realizar el procesamiento utilizando *software* específico a cada método para obtener el valor de la propiedad medida. (en el capítulo 5.2 se muestran los *softwares* más utilizados en México). Existen *softwares* desarrollados por empresas y especialistas que, si cumplen con el objetivo de obtener el parámetro deseado, se pueden utilizar.

9.6.6.6. Revisar que el cálculo del modelo obtenido su error esté dentro de un rango de variación aceptable.

9.6.6.7. Obtener el modelo inverso del modelo estático planteado para la zona evaluada, ya sea en forma unidimensional, perfiles o mapas).

9.6.6.8. Generar bases de datos (*.grd, *.dat, *.txt) para ser utilizados con interpoladores o bien, con el propio interpolador que tenga el *software* de procesamiento o también, archivos para ser incorporados a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

9.6.6.9. Generar perfiles y mapas en función de la distribución de la propiedad medida, en dos o tres dimensiones o también, en función de la profundidad de investigación. Esta información debe de ser clara, precisa y la presentación y los textos de los mapas, perfiles y gráficas deben de ser lo suficientemente grandes para que puedan leerse.

9.6.7. Interpretación

Sobre este punto en el capítulo 6 se detallan las acciones que deben realizarse una vez que se ha realizado el procesamiento de la información

9.6.7.1. Identificar en los perfiles o mapas de la propiedad obtenida, anomalías (valores contrastantes). En esta situación se identificarán tantas como cambios en los contrastes de

resistividad se presenten (ver Figura 6.2). Las variaciones identificadas se les asigna un valor numérico y se les conoce como cuerpos resistivos, el cual puede ir creciendo conforme se va profundizando.

9.6.7.2. Identificar en los perfiles de corte geoelectrico las variaciones de valores de la propiedad medida, tanto a profundidad como en forma lateral. Las unidades se identifican con letra mayúscula y se les conoce como unidades geoelectricas (Ver Figura 6.3).

9.6.7.3. Describir las características, posición, variaciones laterales y verticales tanto de los cuerpos resistivos como de las unidades geoelectricas.

9.6.7.4. Si se realizan mapas a diferente profundidad de investigación describir los comportamientos de la distribución de la propiedad en planta. (Ver Figura 6.4).

9.6.7.5. Correlacionar la información con alguna evidencia física real existente en la zona (corte litológico de pozo, registro geofísico de pozo, geología superficial y propiedades estáticas e hidrodinámicas).

9.6.7.6. Integrar una sección geológico-hidrogeológica esquemática de las condiciones que se presentan en el subsuelo en función de la porosidad y permeabilidad de las rocas.

9.6.8. Integración

9.6.8.1. Correlacionar toda la información existente de la zona evaluada (topografía, hidrología, geología, hidrogeología y geofísica con el propósito de llegar al objetivo planteado al inicio del estudio, enfocando principalmente los resultados a la capacidad de las rocas para almacenar y/o ceder agua; ya sea, en condiciones de extracción, inyección o contaminación, entre otras.

9.6.8.2. Integrar una sección geológico-hidrogeológica esquemática de las condiciones que se presentan en el subsuelo en función de la porosidad y permeabilidad de las rocas, que permitan tomar decisiones en cuanto a perforar o no un pozo, a definir sitios con intrusión marina, a calidad y contaminación, a la detección de acuitardos, a la conexión entre acuíferos, a la carsticidad, a la identificación de contactos material compacto con material granular, a la identificación de estructuras geológicas con potencial hidráulico, a la identificación de estructuras en acuíferos para geotermia, a la delimitación en planta de alguna propiedad hidrogeológica con base en la respuesta Hidrogeofísica y al riesgo geológico.

9.6.9. Resultados

Sobre este punto en el capítulo 8 se detallan las acciones que deben realizarse en la etapa de resultados.

9.6.9.1. Presentar los resultados en forma ordenada y con base en la solicitud del cliente.

9.6.9.2. Describir en un texto escrito las actividades que se desarrollaron para cumplir el objetivo planteado.

9.6.9.3. Dar el dictamen sobre la condición Hidrogeofísica de la zona.

9.6.9.4. Plantear, si es necesario, la necesidad de nuevo conocimiento para detallar o ampliar el alcance del estudio realizado.

9.6.9.5. Incluir en un anexo los datos de campo. Hay que recordar que el cliente es quien contrata la campaña de Hidrogeofísica y que el contratante, plantea con base en su experiencia e información disponible un modelo estático de las condiciones físicas (propiedades del subsuelo).

9.6.9.6. Entregar al menos un volumen físico (texto) y un archivo digital con toda la información recopilada y adquirida.

9.6.9.7. Los resultados deberán ir avalados por el ingeniero geofísico responsable de la actividad Hidrogeofísica, para lo cual deberá incluir su Cédula Profesional.

Capítulo X. Conclusiones y recomendaciones

10.1. Conclusiones

1. Con este trabajo se intenta asegurar que los demandantes de estudios de Hidrogeofísica y los geofísicos, conozcan el proceso que conlleva un estudio de Hidrogeofísica para:
 - Entender los procesos de planeación, adquisición, procesamiento, interpretación, integración, dictamen y qué información se debe entregar.
 - Entender que la Hidrogeofísica se enfoca a la definición de propiedades como porosidad, permeabilidad, que si bien con la geofísica es difícil de obtener; con este trabajo se plantean técnicas y la relación con la hidrogeología es posible identificar rasgos que apoyan al hidrogeólogo.
 - Conocer las técnicas más usadas en la exploración Hidrogeofísica.
 - Conocer los equipos más usados en México para la adquisición de datos de Hidrogeofísica.
 - Reducir la incertidumbre e incrementar el éxito exploratorio.
2. Al contar con un lineamiento que indica actividades y entregables definidos, se podrán tener mejores resultados y los geofísicos o empresas que ofrecen sus servicios podrán entrar en una competencia leal.
3. Este trabajo es una guía para que los usuarios de los servicios de la geofísica conozcan las bondades y sepan qué pedir cuando tengan necesidad de utilizarla para resolver sus problemas sobre las condiciones que se presentan en el subsuelo en función de la:
 - Porosidad y permeabilidad de las rocas, que permita tomar decisiones en cuanto a perforar o no un pozo.
 - Definición de sitios con intrusión marina.
 - Identificación de sitios contaminados.
 - Detección de acuitardos.
 - Conexión entre acuífero.
 - Carsticidad.
 - Identificación de contactos material compacto con material granular y de estructuras geológicas con potencial hidráulico; o bien, a la identificación de estructuras en acuíferos para geotermia.
 - Delimitación en planta de alguna propiedad hidrogeológica con base en la respuesta Hidrogeofísica.
 - Riesgo geológico.

4. La Hidrogeofísica está dirigida a mejorar el uso simultáneo de mediciones geofísicas e hidrogeológicas, al combinar mediciones hidrogeológicas con métodos geofísicos, se puede lograr una caracterización y monitoreo más precisa del subsuelo, con una alta resolución temporal y espacial en un rango de escalas espaciales.
5. El éxito de la Hidrogeofísica depende no solo del diseño del método o técnica a aplicar, sino también de la consideración de una serie de factores geológicos, hidrogeológicos y de ruido; de los cuales hay que considerar: la naturaleza, tamaño y profundidad del objetivo a investigar.
6. La separación de las mediciones depende de la profundidad de investigación, tamaño del objetivo y la técnica de adquisición. La adquisición de información Hidrogeofísica se realiza a lo largo de perfiles o mallas cuadrículas o dispersas; por lo tanto, el espaciamiento entre mediciones se debe calcular junto con la separación de las líneas para no perder el tamaño del objetivo particular. Una regla general es que una anomalía geofísica será aproximadamente el doble del tamaño del objeto que causa la anomalía, por lo que dará el espacio máximo entre la línea y la estación.
7. La clave del éxito de un estudio de Hidrogeofísica está en la calibración de los datos geofísicos con información real de tipo geológica, hidrogeológica o perforaciones.
8. Las técnicas de la Hidrogeofísica se han centrado en su mayor parte en las áreas de zonas saturadas, no saturadas y suelo. Estas áreas comprenden una gran parte de los intereses en las ciencias hidrogeológicas, pero están lejos de completar la gama de problemas donde se necesitan datos, extensos tanto en el espacio como en el tiempo.
9. Una de las limitaciones clave de Hidrogeofísica es su escala de aplicación (de metros a cientos de metros); los retos del mundo moderno requieren de estudios a mayor profundidad de investigación; así como la logística de adquisición de datos en zonas urbanas: retos que deberán resolverse con diseños de adquisición más complejos, así como equipos y tecnologías más sofisticadas.
10. Otro desafío que se vislumbra está en la integración de datos de Hidrogeofísica, geológicos e hidrogeológicos con las relaciones petrofísicas, con el propósito de mejorar la caracterización y monitoreo del subsuelo. Muchas de las relaciones que vinculan los parámetros hidrogeológicos (como el tamaño medio del grano, la porosidad, el tipo y la cantidad de fluido de poros) en los entornos hidrogeológicos cercanos a la superficie con los atributos geofísicos (como la velocidad sísmica, la resistividad eléctrica y la constante dieléctrica) no se comprenden bien. Aunque se han realizado investigaciones para indagar las relaciones entre geofísica y litología o fluido de poros en el área del petróleo y minería, poco o nada se ha hecho en la investigación petrofísica asociada a ambientes menos consolidados, de baja presión y de baja temperatura comunes a investigaciones hidrogeológicas.
11. Una de las bondades de la Hidrogeofísica es que busca resaltar los contrastes en cualquier propiedad física que pueda distinguir a una formación geológica de otra.
12. Se hace hincapié de que estos lineamientos son la base para iniciar la normatividad de la actividad Hidrogeofísica, por lo que es necesario consensuar con otros ingenieros y especialistas de la geofísica para mejorarlos y reforzarlos.
13. Un área de oportunidad que se presenta, derivado de esta propuesta de lineamientos, es la de extender la metodología de los otros métodos geofísicos relacionados con la hidrogeología.

14. En la medida que los usuarios de la geofísica conozcan más sobre los métodos geofísicos, se abrirán nuevas áreas de oportunidad para el desarrollo de la geofísica.

10.2. Recomendaciones

Dar a conocer estos lineamientos al Colegio de Geofísicos de México para que los tome como el inicio de la normatividad de las actividades geofísicas.

Dar a conocer estos lineamientos a los usuarios de la Hidrogeofísica como CONAGUA, Organismos operadores de Agua, Comisiones Estatales de Agua.

Promover este trabajo con los estudiantes de las carreras de Ingeniero Geofísico que existen en México como material didáctico.

Bibliografía

Revistas técnicas:

Applied Geophysics

Geophysics

Geophysical Prospecting

Journal of Environmental and Engineering Geophysics

Ground Water

American

Asociaciones Técnicas de profesionistas relacionadas con la Hidrogeofísica

- International Association of Hydrogeologists
- United States Geological Survey
- Environmental and Engineering Geophysical Society
- American Association of Petroleum
- Asociación Geohidrológica Mexicana
- Colegio de Geofísicos de México
- <http://www.eegs.org/sageep/>

Libros, apuntes y tesis

Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Pet. Tech.*, vol 5, No. 1

Classification of carbonate reservoir rocks and petrogeophysical considerations: American Association of Petroleum Geologists. Bulletin, v. 36, no. 2, p. 278-297.

Arroyo Carrasco, F.A., 1996, Bases teóricas e interpretación de registros geofísicos de pozos, Departamento de Geofísica, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Arrubarrena Morenos. M.; Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos usando tomografía de resistividad eléctrica, Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.

Auge, M., 2008, Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Auken, E., L. Pellerin, N. B. Christensen and K. Sørensen, 2006, A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods, *Geophysics*, 71(5), G249–G260.

Balsubramanian A., 2017, Methods of groundwater exploration, Centre for advanced studies in earth science, University of Mysore.

Bernard, J., 2003, Parameters controlling the depth of investigation; Depth of investigation of vertical electrical sounding; Depth of investigation of multi-electrode resistivity imaging; Depth of investigation of multi-electrode resistivity imaging with roll along extensions. www.HeritageGeophysics.com; support@HeritageGeophysics.com

Binley, A., Cassiani, G., Deiana, R., 2010, Hydrogeophysics: opportunities and challenges, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 51, n. 4, pp. 267-284.

Borrocu, G., Ranieri G., TDEM: A useful tool for identifying and monitoring the fresh-saltwater interface. Department of Territorial Engineering Faculty of Engineering - University of Cagliari, Italy.

Cabrales Vargas, A., 2001. Una propuesta para la estimación de parámetros hidrodinámicos de las rocas, con base en información obtenida a partir de la exploración geoelectrica (SEVs). Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis professional.

Casas A. 2002, Prospección Geofísica Aplicada a la Hidrogeología. Metodologías y Técnicas Emergentes. Barcelona.

Christiansen, A.V., Auken, E. and Sørensen, K. (2006). The Transient Electromagnetic Method. *Groundwater Geophysics, a tool for Hydrogeology*. Springer Berlin Heidelberg, editor: Dr. Reinhard Kirsch.

Colín Colín, J.T., 2003. Etapas y actividades geofísicas y geohidrológicas que se requieren para la perforación de un pozo de agua. Facultad de Ingeniería, Tesis Profesional.

Comisión Estatal de Agua de Guanajuato, Términos de referencia para obtener la validación de proyectos de perforación de pozos profundos para agua potable, (Internet)

Comisión Estatal del Agua Nayarit, Especificaciones para la elaboración de estudios geofísicos y geohidrológicos. (Internert).

Comisión Nacional del Agua, 2011. Ley de Aguas Nacionales.

De Groot-Hedlin C., Costable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, vol. 55, No. 12 (december IWO): P. 1613-1624,

Diario Oficial de la Federación, 2017, LINEAMIENTOS para el otorgamiento de concesiones o asignaciones de agua subterránea salada proveniente de captaciones ubicadas en la proximidad del litoral. CONAGUA

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

Estrada; L. A., 2009, Procesamiento de datos geofísicos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucuman.

Falgás Parra, E., 2007, Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool in Aquifer Appraisal: Focus on AMT Capabilities, Universidad de Barcelona, Departamento de Geodinámica y Geofísica. Tesis doctoral

Fetter, C. W. 1980. *Applied Hydrogeology*. Merrill, Columbus, Ohio.

Fitts, Ch, 2002, *Groundwater Science*, Academic Press, Elsevier Science, California.

Fitterman, D. V. and Stewart, M. T. 1986, Transient Electromagnetic Sounding for Groundwater, *Geophysics*, vol. 51, no. 4, pp. 995-1005.

Furman, A., Ferre, TyP.A., Warrick, A.W., 2003; A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling, *Vadose Zone Journal* 2(3):416-423 · August 2003.

Grant, F. S. and West, G. F. 1965. *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw-Hill, New York.

Hinnell, A.C., T. P. A. Ferré, J. A. Vrugt, J. A. Huisman, S. Moysey, J. Rings and M. B. Kowalsky, 2010, Improved extraction of hydrologic information from geophysical data through coupled hydrogeophysical inversion, *Water Resources Research*, 46.

Hubbard, S.S., 2002, Study Institute Assesses the State of Hydrogeophysics, *Eos*, Vol. 83, No. 51, 17, pp 606-606.

Hubbard, S., Rubin, Y., 2005, *Hydrogeophysics*, Springer, Netherlands.

Hubbard, S.S., 2008, The evolution of hydrogeophysics, *The Leading Edge*, pp 824.

Hubbard, S.S., and Linde, N., 2010, *Hydrogeophysics*, Chapter 20 in *Treatise in Water Science*, Volume 2, Ed. S. Uhlenbrook, Elsevier.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (2013), Términos de Referencia para realizar Estudio de exploración para localizar posibles sitios de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Frontera, Centla, Tabasco (Internet).

Johnson, T.C., R. J. Versteeg, H. Huang and P. S. Routh, 2010, Data-domain correlation approach for joint hydrogeologic inversion of time-lapse hydrogeologic and geophysical data, *Geophysics*, 74(6), F127–F140.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, A.; 1991, *An Introduction to Geophysical Exploration*, Third edition, Blackwell Science.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002, *An Introduction to Geophysical Exploration*, Blackwell, Science, Third Edition

- Kelly, W.E., 1977, Geoelectric Sounding for Estimating Aquifer Hydraulic Conductivity, Groundwater. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1977.tb03189.x>
- Koefoed, O., 1979, Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurement. Elsevier Science Publishing Company
- Kovalevsky, V.S.; Kruseman, G.P.; Rushton; K.R., 2004, Groundwater studies; An international guide for hydrogeological investigations, IHP-VI, series on Groundwater, No. 3; UNESCO.
- Lehikoinen, A., 2012, Modeling Uncertainties in Process Tomography and Hydrogeophysics, Publications of the University of Eastern Finland Dissertations in Forestry and Natural Sciences, No 82, Department of Applied Physics.
- Loke, M. H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Inédito.
- Loke, M.H., Baker, R.D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, Society of Exploration Geophysicist; Geophysics, 60(6), 1682-1690.
- Loke, M. H. (1999). A Practical Guide to 2D and 3D Surveys. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, 8-10
- Maxwell A., M. 2001, Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges, Surveys in Geophysics 23: 133–205, 2002. © 2002 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands
- Matheron, G., 1962, *Traité de géostatistique appliquée*, Tome I: Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, no. 14, Editions Technip, Paris, 333 p.
- Mazác, et al 1985, A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers, *Journal of Hydrology* 79(1-2):1-19.
- Mc Neill J.D. (1996). Principles and applications of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. Technical note TN-27 . Geonics Limited.
- McNeill, J.D., 1994. Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding: Geonics Technical Note TN-27, Mississauga, Ontario. pp. 1–15.
- Milson, J., 2003, *Field Geophysics*, Third edition, Wilye.
- Mishra, P.K, Kuhlman, K.L.; 2013, *Advances in Hydrogeology*; Springer.
- Montaño Mejía, F.H., Vega, P.A. 2009, Aplicación de métodos eléctricos de prospección geofísica. *Revista CIER* No. 53, pp. 61-76.
- Mora Herrera, L.J., 2010, Proceso para definir la factibilidad hidrogeológica para la perforación de pozos, con ejemplo de su aplicación, Facultad de Ingeniería, Tesis Profesional.
- Müller, K., J. Vanderborght, A. Englert, A. Kemna, J. A. Huisman, J. Rings and H. Vereecken, 2010, Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers, *Water Resources Research*, 46.
- Mussett, A.E., Khan, M.A., 2000, *Looking into the Earth, An introduction to geological geophysics*, Cambridge University Press.
- Nabighian, M.N. and Macnae, J.C. (1991) Time Domain Electromagnetic Prospecting Methods. In: Nabighian, M.N., Ed., *Investigations in Geophysics No 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma, 427-514.
- NOM-127-SSA1-1994 Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1996 y Modificación publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de noviembre de 2000.

NOM-003-CONAGUA-1996 Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de febrero de 1997.

NOM-004-CONAGUA-1996 Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1997.

NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

NOM-014-CONAGUA-2003 Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

NOM-015-CONAGUA-2007 Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua.

Diario Oficial de la Federación, 11-05-2017, LINEAMIENTOS para el otorgamiento de concesiones o asignaciones de agua subterránea salada proveniente de captaciones ubicadas en la proximidad del litoral.-

Nwankwoala, H.O. y Udom, G.J., 2008, Hydrogeophysics: an overview of general concepts, applications and future perspectives, *Scientia Africana*, Vol. 7 (No.2), December 2008; pp 54-63.

Ochuko A. 2015, Hydrogeophysical and hydrogeological investigations of groundwater resources in Delta Central, Nigeria. *Journal of Taibah University for Science* 9 (2015) 57–68.

Oldenburg, D. and Y. Li, 2005, Inversion for applied geophysics: A tutorial, In: *Near -Surface Geophysics, Investigations in Geophysics No. 13*, by D.K. Butler (Ed.), Society of Exploration Geophysicists.

Orellana, E. 1982. *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo, Madrid.

Pérez Cruz, G.A., 1986, *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México*, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría.

Pérez-Rosales C. (1982). "On the relationship between formation resistivity factor and porosity". *Society of Petroleum Engineers Journal*, August, pp. 22 – 31, ISSN: 0168-132X, Society of Petroleum Engineers, USA.

Ravelo M., D.J., 2007, *Inversión e interpretación de datos de resistividad aparente en 2D adquiridos en relieve topográfico*, Universidad Simón Bolívar, Tesis profesional.

Reséndiz Ortiz, P.A., 2015, *Identificación de estructuras hidrogeológicas con apoyo de la técnica geofísica de magnetometría aérea*, Facultad de Ingeniería, Tesis Profesional.

Robinson, D.A., A. Binley, N. Crook, F. Day-Lewis, P.T. Ferré, V.J.S. Grauch, R. Knight, M. Knoll, V. Lakshmi, R. Miller, J. Nyquist, L. Pellerin, K. Singha and L. Slater, 2008, Advancing process based watershed hydrological research using near-surface geophysics: A vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods, *Hydrological Processes*, 22, 3604– 3635.

Robinson, E.A., Treitel S., 2000, *Geophysical Signal Analysis*, SEG book.

Rubin Y. y Hubbard S., 2005, Hydrogeophysics, Springer, Water Sciences and Technology Library.

Ruiz A., M.C. 2015, Procesos estocásticos, Apuntes, página web
http://www.dmae.upct.es/~mcruiz/Telem06/Teoria/apuntes_procesos.pdf.

Scales, J. A. y Snieder, R. 1998, What is noise? Geophysics, vol. 63, no. 6 (july-august); p. 1122-1124.

Scales, J. A. y Snieder, R. 2000, The Anatomy of Inverse Problems, Geophysics, vol. 65, no. 6 (november-december); p. 1708–1710.

Slater, L., 2007, Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries—A Review, Surveys in Geophysics, 28:169–197.

Spiegel, M.R., Stephens, L.J, 2009, Estadística, McGrawHill, cuarta edición, México

Sultan, A.W., Ismail, M.M., Santos, F.M., 2009, Hydrogeophysical study of the El Qaa Plain, Sinai, Egypt; Bull. Eng. Geol. Environ. 68:525–537.

Tejero, A., Chávez, R.E., Urbietta, J., Flores-Márquez, E.L., 2002, Cavity detection in the south-western hilly portion of Mexico City by resistivity imaging, Journal of Engineering and Environmental Geophysics, 130-139.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A. 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press.

Torleif D., Bing Z. 2004, A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. Geophysical Prospecting, 52, 379–398

Valdhondo, D., 2003, Gestión del Conocimiento del mito a la realidad, Ed. Díaz de Santos.

Vences E., O.E.G., 2013, Adaptación de datos de sondeos eléctricos verticales para obtener imágenes eléctricas 2d, Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis Profesional.

Vereecken, H., Binley, A., Cassiani, G., Revil, A., Titov, K., 2004, Applied Hydrogeophysics, Springer

Vozoff, 1972 The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, Geophysics, 37, pages 98-141.

Read More: <https://library.seg.org/doi/10.1190/1.1444178>

Walpole, R.E.; Myers; R.H., Myers, S.L., Ye, K., 2012, Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias, Pearson, México, Novena edición.

Winship, P., A. Binley and D. Gomez, 2005, Flow and Transport in the Unsaturated Sherwood Sandstone: Characterisation using Cross-borehole Geophysical Methods, In: The Permo-Triassic Sandstone by Tellam and Barker (Eds.), Geological Society Special Publication 263, 219-231.

Zúñiga L., R, 2015, Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala, Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis profesional

Manuales de los equipos considerados en este trabajo

EQUIPOS

Sirotem 3 Operator's Manual, Mineral Control Instrumentation

Ares – Automatic Resistivity System, GF Instruments

Syscal Pro, Operations manual, Iris Instruments

Scintrex, IPC7-IPR10A

Terratem Operations Manual, Monash Geoscope

PROCESAMIENTO

TerraWare TDEM, 2019, Geotem Ingeniería, S.A de C.V.

WingLink, A guide to using, Geosystem SRL

Resixplus, manual operators

Res2dinv, Geotomo

Interpex Limited 1-D Interpretation

IPIWIN, manual operators

Temix, manual operators