



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

ESTIMACIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN A PARTIR DE RESISTIVIDADES
ELÉCTRICAS, APLICADOS AL CASO DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN: MINERA
AMALIA, REGIÓN DE VALPARAÍSO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOFÍSICA

ESTEBAN ENRIQUE DÍAZ DÍAZ

PROFESOR GUÍA:
DANIEL DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GONZALO MONTES ATENAS
EMILIO VERA SOMMER

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN GEOFÍSICA
POR: ESTEBAN ENRIQUE DÍAZ DÍAZ
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: DANIEL DÍAZ ALVARADO

ESTIMACIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN A PARTIR DE RESISTIVIDADES
ELÉCTRICAS, APLICADOS AL CASO DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN: MINERA
AMALIA, REGIÓN DE VALPARAÍSO

En el presente trabajo se estudiaron las propiedades petrofísicas, tales como la porosidad, factor de cementación, porcentaje de saturación y factor de saturación del material de una pila de lixiviación en la minera Amalia (ciudad de San Felipe, región de Valparaíso) con la finalidad de conocer sus porcentajes de saturación teniendo sólo como variable conocida la distribución de resistividades interna. Esto con el objetivo de poder mejorar en un futuro los sistemas de hidratación interna de las pilas de lixiviación.

El modelo empírico utilizado en este trabajo es la ecuación de Archie, la cual, además de incorporar la resistividad y porcentaje de saturación, presenta otras variables como: el factor de tortuosidad (τ), porosidad (ϕ) y los exponentes de cementación (m) y saturación (n). Sin embargo, para este modelo, m , n y ϕ (valores propios del material) son inicialmente desconocidos y se han calibrado de forma experimental para conseguir un porcentaje de saturación satisfactorio.

La ecuación de Archie, representa un modelo lineal entre el logaritmo de la saturación y el logaritmo del factor de formación (F), siendo este último la razón entre la resistividad medida y la resistividad del fluido. A partir de esto, por medio de una regresión lineal entre la saturación y el factor de formación encontrados en laboratorio, se calcula de forma experimental los parámetros propios del material (ϕ , m y n), calibrando así el modelo de Archie.

Se realizaron dos experimentos distintos. El primero, con tierra común utilizando como fluido agua potable, con el objetivo de probar la experimentación y llegar a los resultados esperados. El segundo, con material proveniente del aglomerador de la mina Amalia, material similar con el que se quiere calibrar la ecuación de Archie, utilizando como fluido una combinación de agua destilada y ácido sulfúrico, emulando el fluido utilizado en la hidrometalurgia. Dicha combinación debe alcanzar un pH de 1.6, presentando una resistividad de $1.3 [\Omega \cdot m]$ aproximadamente.

Finalmente, con los parámetros encontrados se logró obtener un porcentaje de saturación del material a partir de su resistividad. En términos geofísicos ha permitido obtener perfiles bidimensionales de saturación en profundidad a partir de tomografías de resistividad adquiridos mediante ERT (Electrical resistivity Tomography).

Palabras claves: *Resistividad aparente, ERT, Lixiviación, factor de cementación, factor de saturación, porosidad, factor de formación*

*Dedicada a mi madre, Susana Díaz.
Lo lograste...*

Agradecimientos

Comenzar agradeciendo a mi familia, mi madre Susana, mi hermana Marta, mi sobrina Angela y mis tíos, Luis Díaz y Lucía Piga por el incondicional apoyo y amor que me brindaron durante toda mi vida, en especial en este término de proceso. Además, agradecer a mi tía Martita que me ha acompañado y apoyado durante mi vida.

Agradecer a mis profesores, tanto de la licenciatura como del magister en Geofísica, y en especial a mis profesores de comisión que me ayudaron incansablemente en este arduo trabajo. Una mención a Gonzalo Montes, que a pesar de no ser del departamento de geofísica, me entregó las herramientas necesarias para poder efectuar un trabajo satisfactorio de laboratorio. Además, agradecer a Sergio Contreras, el gestor de este proyecto. Agradezco al Núcleo de Geofísica (NGA), por su colaboración y apoyo en el proceso de este trabajo de Tesis.

Entregar un reconocimiento especial a mis amigos del colegio: Felipe González, Ignacio Aburto, Ivo Arnold y Bastián Espinoza (Los backstreet boys Chilenos). A mis amigos de la universidad: Álvaro Acuña, Alonso Guzmán, Pablo Corada, Cristián Siegel, Daniela Montecinos, Daniel Cabrera, Ariel Figueroa, Sebastián Arriola y Jose Mieres. Por último y no menos importante, a mis grandes amigos de la vida: Camilo Montt, Nicolas Ojeda, Christian Montt, Marcelo Fuentes, Camila Serey y mi mejor amiga Natalia Méndez. Gracias por tanto, perdón por lo poco.

Finalmente agradecer a las personas, que en este último proceso me acompañaron, aconsejaron y apoyaron: Emma Fonseca, gracias señora Emma por ayudarme en un proceso nuevo que fue trabajar en un laboratorio. Isora Brito, gracias Isora por el apoyo brindado durante mi práctica y actualmente como tu compañero de trabajo.

Por último, me quiero dar esta instancia para agradecer a mi ídolo juvenil, Esteban Efraín Paredes Quintanilla, actual jugador y capitán del equipo de mis amores, Colo-Colo. Gracias Tocayo.

Tabla de Contenido

Nomenclatura	1
1. Planteamiento del Problema	3
1.1. Introducción	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Alcances	4
2. Fundamento Teórico	5
2.1. Introducción	5
2.2. Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) y Tomografía Eléctrica (ERT, Electrical Resistivity Tomography)	5
2.2.1. Base teórica de ambos métodos	5
2.2.2. Fundamentos del método	8
2.3. Lixiviación	12
2.3.1. Introducción	12
2.3.2. Conceptualización de una pila de lixiviación	12
2.3.3. Etapas del proceso de lixiviación en pilas	14
2.4. Petrofísica	16
2.4.1. Porosidad (ϕ)	17
2.4.2. Tasa de vacíos	18
2.4.3. Saturación	19
2.4.4. Contenido de Humedad ω	20
2.4.5. Factor de tortuosidad (τ)	20
2.4.6. Ley de Archie	21
2.4.7. Ley de Waxman-Smits	23
2.4.8. Selección del Modelo adecuado a utilizar, ¿Waxman-Smits o Archie?	24
3. Metodología	25
3.1. Introducción	25
3.2. Toma de datos en la pila de lixiviación real	25
3.2.1. Equipo de adquisición de datos	26
3.2.2. Metodología de Inversión para tomografía de resistividad eléctrica	27
3.2.3. Procesamiento e Inversión de Datos en terreno	31
3.3. Experimentación Petrofísica en laboratorio	33
3.3.1. Objetivo del experimento	33

3.3.2.	Instrumentos de Laboratorios y Montaje del Experimento	33
3.3.3.	Procedimiento de laboratorio para estimar Porcentaje de Saturación.	37
3.3.4.	Procedimiento de laboratorio para medir Resistividad del Material poroso	40
3.3.5.	Procedimiento de laboratorio para estimar Resistividad del Fluido . .	41
3.3.6.	Propagación de Errores en medición	43
3.3.7.	Metología de Inversión de datos en laboratorio	43
3.3.8.	Inversión de datos para aproximación por mínimos cuadrados y descripción de Script a emplear	45
3.4.	Experimento de prueba, utilizando material no consolidado de Campus Beauchef	47
4.	Resultados y Discusión	50
4.1.	Introducción	50
4.2.	Resultados de Laboratorio Petrofísico	50
4.2.1.	Material proveniente de pila de lixiviación	51
4.2.2.	Conductividades del fluido antes y después de ser filtrados en sólido .	56
4.2.3.	Cálculo de la porosidad para el material de la pila por definición . . .	57
4.3.	Resultado Final	59
	Conclusiones	60
	Referencias	63
A.	Determinación de la Densidad del material proveniente del aglomerador	66
B.	Preparación del fluido lixivante	67

Índice de Tablas

2.1.	Valores típicos de porosidad y tasa de vacío para diferentes materiales granulares	18
2.2.	Valores del exponente de Archie (m) para diferentes materiales consolidados y no consolidados	22
2.3.	Valores de conductividad superficial del grano, para diferentes suelos del modelo de Waxman-Smits	24
3.1.	Tabla de resultados de resistividad eléctrica para un fluido medido con el método SEV	42
3.2.	Tabla de resultados experimentación con material granular no consolidado. Resistividad del fluido medido con conductímetro	47
3.3.	Valores obtenidos para error de conservación de masas entre masa seca y masa del fluido	47
3.4.	Valores petrofísicos obtenidos para material no consolidado. ϕ , m y n	48
4.1.	Resultados Experimentación con material granular proveniente del aglomerador, experimento <i>zona superior</i>	53
4.2.	Valores petrofísicos obtenidos para material proveniente del aglomerador. ϕ , m y n , zona superior	54
4.3.	Resultados Experimentación con material granular proveniente del aglomerador, experimento <i>zona inferior</i>	54
4.4.	Valores obtenidos para material proveniente del aglomerador. ϕ , m y n , zona inferior	55
4.5.	Tabla de comparación entre conductividades eléctricas del fluido antes y después de ser permeados a través del material sólido. Suelo de Beauchef.	57
4.6.	Tabla de comparación entre conductividades eléctricas del fluido antes y después de ser permeados en el material sólido, material proveniente del aglomerador.	57
4.7.	Tabla de valores de porosidad calculado por definición	58
A.1.	Tabla de densidad del material granular, calculada por el método de Arquímedes	66

Índice de Ilustraciones

2.1. Distribución de flujos de corrientes en un suelo homogéneo	6
2.2. Arreglos geométricos del método ERT	7
2.3. Arreglo convencional Dipolo-Dipolo	8
2.4. Diagrama de densidad de corriente en una sección transversal	9
2.5. Resistor	9
2.6. Ilustración y configuración para corriente y potencial	10
2.7. Arreglo convencional de cuatro electrodos para métodos eléctricos	11
2.8. Pila de lixiviación, con sus componentes asociados	13
2.9. Método de riego de un ciclo de lixiviación	14
2.10. Foto de glómeros en pila de lixiviación, minera Amalia	15
2.11. Esquema de una pila de lixiviación de tipo estática y sus principales elementos	16
2.12. Pila de Lixiviación de tipo Dinámica, minera Amalia	16
2.13. Representación de Porosidades	17
2.14. Diferencia entre un suelo saturado y parcialmente saturado	20
2.15. Difusión del camino de un fluido en un medio poroso, Tortuosidad	21
3.1. Esquema de líneas de medición en pila dinámica, módulo 11B	26
3.2. Equipo de ERT Syscal Pro Switch 48	27
3.3. Ejemplo Pseudosecciones de resistividad aparente	32
3.4. Ejemplo Modelo de resistividad 2D	32
3.5. Recipiente utilizado para experimentación	34
3.6. Instrumentos de Laboratorio	35
3.7. Instrumentos de inyección de corriente en vaso experimental	36
3.8. Esquema de conexión SEV en material granular	37
3.9. Horno de secado para muestras	38
3.10. Inversor de corriente	40
3.11. Conductímetro WTW 2X00-001A	41
3.12. Resultados de resistividad eléctrica para un fluido, medidos con SEV	42
3.13. Experimentación únicamente con fluido utilizado en la primera experimentación (agua potable)	42
3.14. Algoritmo de búsqueda del valor de porosidad del medio ϕ	46
3.15. Gráfico experimento con material no consolidado Campus Beauchef	48
3.16. Material granular no consolidado de campus Beauchef	49
4.1. Gráfica de niveles superior e inferior	52
4.2. Gráfica resultados material proveniente del aglomerador, experimentación zona superior	53

4.3. Gráfica resultados material proveniente del aglomerador, experimentación zona inferior	55
4.4. Sección de resistividad y saturación, adquiridos 15 horas después de comenzado el riego	59
4.5. Sección de resistividad y saturación, adquiridos 24 horas después de comenzado el riego	60

NOMENCLATURA

Símbolos Latinos

k	Factor Geométrico [m]
I	Corriente Eléctrica [$Amperes$]
t	Tiempo Medido [s]
A	Área [m^2]
J	Densidad de Corriente [$\frac{Amperes}{A}$]
V	Potencial eléctrico [V]
R	Resistencia [Ω]
D_s	Densidad del sólido [$\frac{Kg}{m^3}$]
V_p	Volumen de Poros [m^3]
V_T	Volumen Total [m^3]
V_g	Volumen del Granos [m^3]
V_s	Volumen del Sólidos [m^3]
V_v	Volumen Vacío [m^3]
e	Tasa de Vacío [$-$]
S_x	Saturación de la fase x [$-$]
W_w	Masa del Suelo Húmedo [Kg]

W_s Masa del suelo Seco [Kg]

m Factor de cementación [-]

n Factor de saturación [-]

Símbolos Griegos

ρ_{eff} Resistividad Medida [Ωm]

ρ_w Resistividad del fluido [Ωm]

σ_{eff} Conductividad Medida [$\frac{S}{m}$]

σ_w Conductividad del fluido [$\frac{S}{m}$]

σ_A Desviación estandar para la variable **A**

ϕ Porosidad [-]

τ Factor de Tortuosidad [-]

ω Contenido de Humedad [-]

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

1.1. Introducción

El desarrollo de lixiviación en pilas, es un proceso hidro-metalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales que lo contiene aplicando una solución ácida, formada principalmente por ácido sulfúrico y agua. Este proceso consiste en un intercambio químico entre los minerales oxidados y soluciones ácidas, debido a la sensibilidad de los óxidos al ataque de soluciones ácidas (López Alfaro, 2012). Es ampliamente utilizado para minerales de cobre de baja ley en las pilas de lixiviación, debido a su bajo costo y buenos resultados (Smith y Steemson, 2009).

Las pilas de lixiviación, son estructuras terraplenes compuestas por minerales de cobres oxidados o sulfurados y ganga, que posterior a su levantamiento son regadas en la parte superior por una solución ácida. Este fluido se infiltra internamente en la pila y se drena por efecto de gravedad, a través de zonas porosas del material. El porcentaje de recuperación de cobre está ligado al contacto y reacción entre el fluido y el mineral, en otras palabras, una mayor humectación de la pila esta asociada a una mayor recuperación de cobre. Sin embargo, el camino recorrido por el fluido tiende a ser tortuoso y no necesariamente sigue solo una dirección. Como consecuencia de estos cambios de dirección, existen zonas internas de la pila que no fueron humectadas, por lo cual la recuperación de mineral se puede ver afectado (Silver, 2013). Para esto se quiere estudiar las propiedades físicas de la roca que forma la pila de lixiviación a partir de datos de conductividades eléctricas. Es decir, conociendo la conductividad eléctrica de la pila, poder estimar el grado de saturación de la roca.

La primera ley empírica en relacionar datos de conductividades eléctricas y propiedades petrofísicas para medios poroso, fue la ley de Archie (Archie, 1942), que relaciona el porcentaje de saturación de un medio poroso con la conductividad del fluido almacenado en los poros de dicho medio. Estudios posteriores realizados por diferentes autores, modificaron dicha ley e incluyeron el factor de tortuosidad (Winsauer et al., 1952), el cual mide la razón del camino óptimo que debería tomar el flujo con respecto a la vertical y siempre es mayor o igual a uno.

Otra de las leyes a estudiar, es la formulación empírica hecha por Waxman y Smits (Waxman y Smits, 1968). Esta formulación, deriva de la ley de Archie, diferenciándose en que Waxman-Smits postulan que existe un factor conductor adicional al fluido, la superficie conductora del medio rocoso, poroso o estratificado. Con estas últimas leyes empíricas, se espera poder comprender de mejor manera las características físicas del material interno de una pila de lixiviación real, dispuesta en la Mina Amalia (región de Valparaíso) y calibrar los parámetros petrofísicos del material y fluido para dicha pila.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Medir el grado de saturación en una pila de lixiviación real por medio de resistividades eléctricas, como parámetro de estudio a través del método tomografía de resistividad eléctrica (ERT).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Presentar casos donde se ha estimado el grado de saturación de un medio a partir de conductividad eléctrica.
- Analizar la sensibilidad de los parámetros, mostrando el comportamiento de las variables ante diferentes cambios.
- Diseñar un experimento acorde a la búsqueda de los parámetros a calibrar de la ecuación de Archie.
- Obtener grados de saturación y conductividades in-situ, utilizando pruebas de laboratorio para dos tipos de suelos: un material arenoso (suelo) y el material empleado en pilas, para la calibración de los parámetros presentes en las ecuaciones petrofísicas.
- Estimar un modelo final con los porcentajes de saturación, a partir de datos de resistividad medidos en una pila de lixiviación real, empleando un modelo petrofísico calibrado.

1.3. Alcances

El presente trabajo muestra un estudio cualitativo y cuantitativo de la predicción del grado de saturación que presenta internamente una pila de lixiviación a la hora del regadío con fluidos ácidos, con datos de conductividades eléctricas. Este estudio, servirá para futuros trabajos aplicados a la búsqueda de agua o zonas de posibles saturación de hidrocarburos.

Sin embargo, una de las limitaciones de este trabajo, es la extrapolación de los datos estimados hacia otros estudios. Es decir, que los valores encontrados en este proyecto de tesis, solo son aptos para los suelos aquí estudiados, ya que las propiedades de absorción, porosidad, exponentes de Archie, conductividades, etc, son propiedades que cambian para cada material granular.

Por otra parte, se harán experimentos en laboratorios que intentan replicar la función de una pila de lixiviación, pero se debe tener en cuenta que al no tener la cantidad real de material, pueden existir problemas de compactación y presiones que no fueron tomadas en cuenta, dejando así que la porosidad encontrada será constante en todo momento.

Capítulo 2

Fundamento Teórico

2.1. Introducción

Para poder entender de buena manera los futuros resultados, experimentaciones y metodologías, se mostrará en el presente capítulo un marco teórico que estructura los principales conceptos, con el fin de entender el proceso de este trabajo. Se desglosarán los tópicos principales de la presente tesis trabajo, como por ejemplo el método geofísico a utilizar, SEV, en las experimentaciones de laboratorio, y el método de Tomografía eléctrica (ERT, *Electrical Resistivity Tomography* siglas en inglés), que se aplicó en las pilas reales de lixiviación; Conceptos de lixiviación y pilas de estas mismas, conceptualizaciones en el ámbito petrofísico y el desarrollo matemático de las inversiones ocupadas en el presente estudio, tanto para los datos medidos en laboratorio, como el software de inversión que utiliza el método ERT.

2.2. Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) y Tomografía Eléctrica (ERT, Electrical Resistivity Tomography)

2.2.1. Base teórica de ambos métodos

SEV (Sondaje Eléctro Vertical) es un método eléctrico muy popular en técnicas de exploraciones geofísica, por sus bajos costos, buenas resoluciones, física simple y eficiente toma de adquisición de dato (Dahlin y Zhou, 2004). SEV utiliza cuatro electrodos, dos que miden voltaje y dos que miden intensidad de corriente. Por el contrario, el método ERT, es un derivado de SEV, ya que cumple con las mismas características físicas, matemáticas y de montaje, con la diferencia que ERT presenta multicanales. En otras palabras, ERT es un método automático que no necesita el movimiento constante de las estacas en terreno. A diferencia de SEV, solo se puede hacer un arreglo específico, y luego se debe trasladar en la misma línea que se acaba de medir. En este trabajo, se utilizó SEV para medir la resistividad del material en laboratorio, mientras que el método ERT fue empleado en el desarrollo de la campaña para medir resistividad en una pila de lixiviación real.

Las mediciones se realizan en una superficie, para obtener resistividades aparentes del subsuelo que reflejan cuantitativamente propiedades tanto en profundidad como lateralmente.

Estos métodos, inyectan corriente al suelo por medio de electrodos de corriente, posteriormente se mide la caída de potencial con la que llegan los flujos de corriente con otros electrodos de potencial eléctrico. Por ende, al conocer la intensidad de corriente y una di-

ferencia de potencial, se puede calcular una resistividad aparente a una cierta profundidad aparente conocida como “effective depth of investigation” (Edwards, 1977). La distancia entre los electrodos de corrientes y los electrodos de potenciales, será el fundamento primario a la hora de la profundidad que se quiere alcanzar. La figura 2.1, muestra la distribución de flujo de corriente en un suelo homogéneo a partir de una fuente (A). Dicha figura, presenta superficies equipotenciales concéntricas las cuales son adquiridas por los electrodos de potencial.

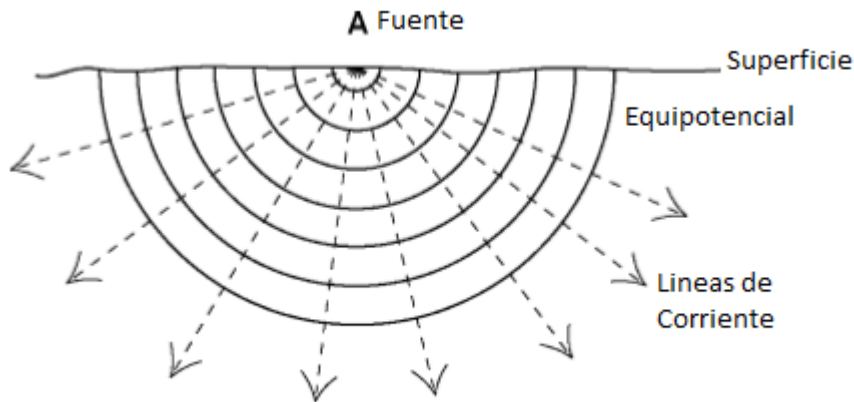


Figura 2.1: Distribución de flujos de corrientes en un suelo homogéneo (A: fuente de corriente) (Samouëlian et al., 2005)

Existen diferentes configuraciones de montaje de estos métodos con el cual se puede trabajar. La distinción entre cada configuración, son esencialmente las posiciones de los electrodos de corriente y electrodos de voltajes. Dada la Figura 2.2, se tiene los electrodos **C1** y **C2** que son de corrientes y los electrodos **P1** y **P2** son de voltaje.

Alguno de los arreglos geométricos para la configuración en terreno de SEV y ERT son:

- Dipolo-Dipolo
- Polo-Polo
- Wenner
- Schlumberger
- Polo-Dipolo

Entre otros.

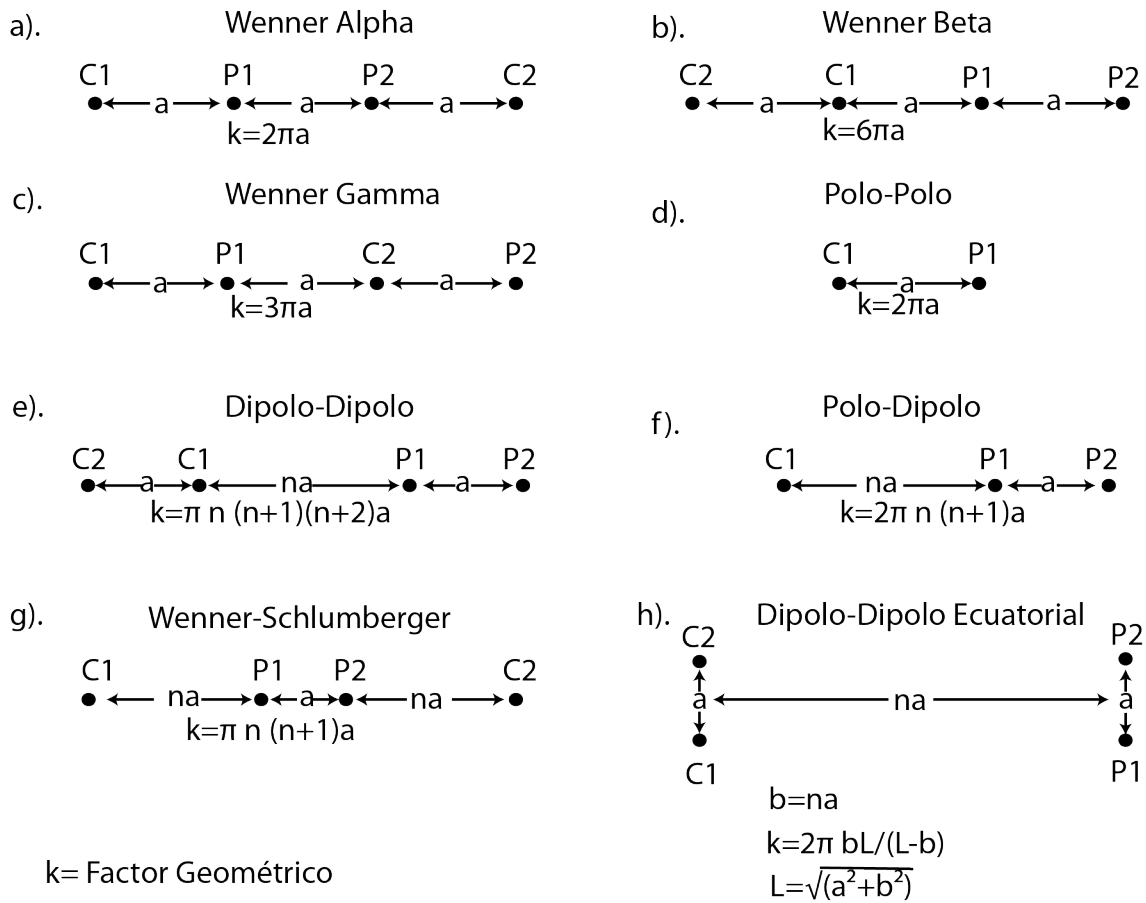


Figura 2.2: Arreglos Geométricos de ERT **a:** Wenner Alpha. **b:** Wenner Beta. **c:** Wenner Gamma. **d:** Polo-Polo **e:** Dipole-Dipole **f:** Pole-Dipole **g:** Wenner-Schlumberger **h:** Ecuatorial Dipole-Dipolo (Loke, 1999)

En la Figura 2.2, se muestra algunas configuraciones en terreno que utilizan tanto método SEV como ERT. En esta Figura, se conoce el factor geométrico k que varía dependiendo del tipo de arreglo que se prepare. Este factor será desglosado más adelante.

La profundidad efectiva de estudio es diferente para cada arreglo, por ejemplo, para el arreglo Dipolo-Dipolo varía aproximadamente de un 25% a 33% de la distancia entre el electrodo de corriente **B** y el electrodo de voltaje **M** (Figura 2.3) (Edwards, 1977). Es decir, cuanto mayor es la separación entre los electrodos de corriente y potencial (na), mayor es la profundidad del método. La figura 2.3, muestra un esquema de lo recién mencionado.

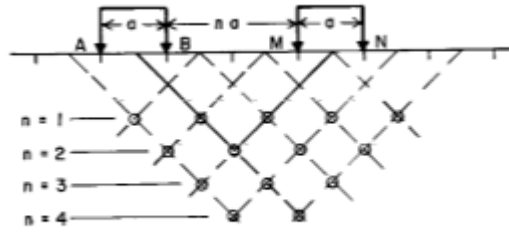


Figura 2.3: Arreglo convencional Dipolo-Dipolo (Edwards, 1977)

Uno de los temas logísticos a la hora de escoger el “mejor arreglo” es poder representar de mejor manera las anomalías de cuerpo en profundidad para la pila de lixiviación.

2.2.2. Fundamentos del método

En los métodos eléctricos Galvánicos (SEV y ERT), la inyección de corriente al suelo, produce diferencias de potencial que posteriormente son medidos por electrodos. Al conocer la intensidad de corriente inyectada en superficie y la diferencia de potencial generada por dicha corriente, se puede conocer la distribución de resistividades por debajo de la superficie (Burger, 1992). En la presente sección, se mostrará las ecuaciones fundamentales de estos métodos Galvánicos.

La intensidad de corriente, mide la cantidad de cargas eléctricas que circula entre puntos a un cierto tiempo. Esta descripción esta dada por la ecuación:

$$I = \frac{q}{t} \quad (2.1)$$

donde I es la corriente eléctrica medida en amperes, q es la carga en coulomb y t es el tiempo en segundos.

Otro concepto importante en los estudios de resistencia eléctrica, es la densidad o flujo de corriente (cantidad de corriente por unidad de área).

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.2)$$

La Figura 2.4 es una ilustración de la densidad de corriente. Al mantener la cantidad de corriente (I), y disminuir la sección transversal, la densidad de corriente aumentará. La ley de Ohm, relaciona la corriente eléctrica (I) medida en amperes, la Resistencia (R) su unidad es Ohm (Ω) y el Voltaje (V), medido en Volt. Dicha relación, se plasma en la ecuación 2.3.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

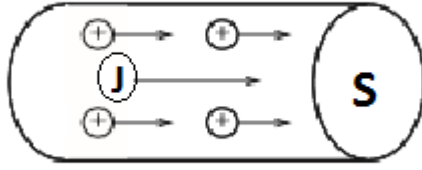


Figura 2.4: Diagrama de densidad de corriente (J) en una sección transversal (S)

Existen diferentes materiales que son más susceptibles al movimientos de las cargas internas dentro del material. En particular, en la geología existen varios materiales con diferentes resistividades a los flujos de corrientes. Es importante entender, la diferencia entre resistencia y resistividad, donde esta última representa un valor intrínseco de un material siendo su unidad de medida es $[\Omega \cdot m]$. En cambio, la resistencia es la oposición al movimiento de las cargas eléctricas. Bajo esta premisa, nos fijamos que la resistencia al movimiento de las cargas no depende solo del tipo de material, sino que también a sus dimensiones.

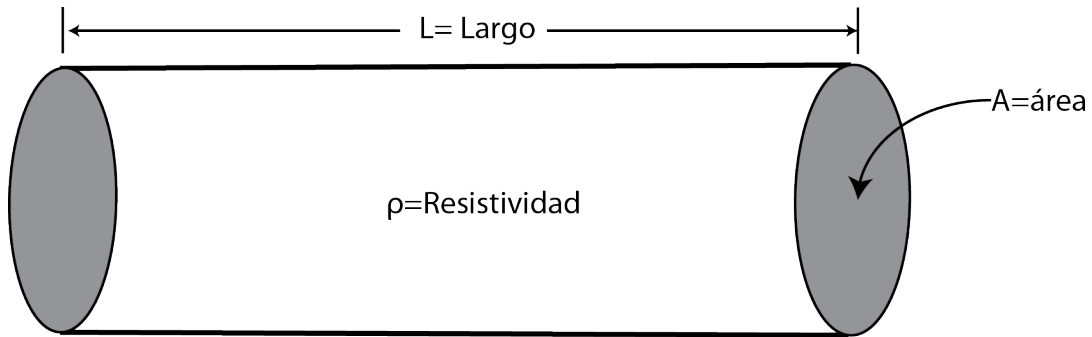


Figura 2.5: Material con presencia de resistencia y dimensiones. A: área transversal. L: largo del material (Burger, 1992)

La Figura 2.5, muestra un cuerpo resistivo, con un largo L , sección transversal A , y con una resistividad eléctrica ρ . En resumen, la resistencia al movimiento de las cargas del material, viene dada por la ecuación 2.4 en unidades de Ohm (Ω)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.4)$$

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2.5)$$

Cabe destacar, que en esta tesis, se trabaja con resistividades y no resistencias, donde la resistividad es una propiedad intrínseca del material, independiente de su geometría, en cambio la resistencia, si depende de la geometría del cuerpo analizado. En general, en estudios de resistividad eléctrica, es común también usar la conductividad $\sigma \left[\frac{S}{m} \right]$, donde sus unidades son Siemens sobre metros.

$$\frac{1}{\rho} [1/\Omega \cdot m] = \sigma \left[\frac{1}{\Omega \cdot m} \right] = \sigma \left[\frac{S}{m} \right]$$

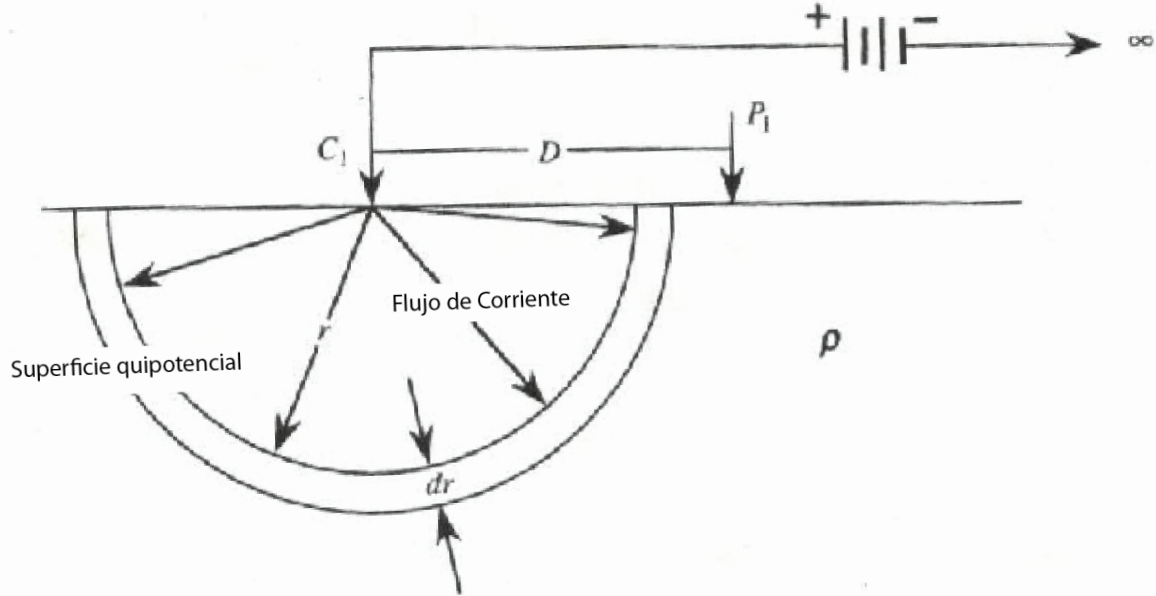


Figura 2.6: Ilustración y configuración usada para determinar el potencial en un punto P_1 dado una fuente única de corriente C_1 . La corriente de llegada C_2 se encuentra en el infinito. Dos superficies equipotenciales contiguas, están separadas por una distancia dr (espesor del cascarón) (Burger, 1992)

Debido a que el método ERT consiste en aplicar corriente y medir potencial, se considera un potencial en P_1 cuando la corriente es aplicada en C_1 por una fuente de corriente (Figura 2.6). Se ubica el electrodo de corriente retorno a una distancia muy grande y asumimos material de resistividad ρ . La distribución de corriente forma una superficie equipotencial de estructura semiesférica de radio r , donde el centro se ubica en C_1 . Se quiere medir la caída de potencial entre dos superficies equipotenciales con una distancia entre ellas de dr (Notar Figura 2.6). Utilizando las ecuaciones 2.3 y 2.4, podemos definir la diferencia de potencial a través del cascarón semi-esférico como:

$$dV = i(dR) = i \left(\rho \frac{dl}{A} \right) = i \left(\rho \frac{dr}{2\pi r^2} \right) \quad (2.6)$$

El área de estudio equipotencial, está definida por una semi-esfera, con una superficie de $A = 2\pi r^2$, donde el largo de la superficie equipotencial esta dado por el espesor de este cascarón (dr). Se quiere determinar el potencial en el punto P_1 (Figura 2.6). Al determinar el potencial en un punto, lo comparamos con el potencial en un punto infinitamente lejano, que por conveniencia es arbitrariamente 0 (Burger, 1992). La forma directa de poder calcular el potencial V , es integrar la ecuación 2.6, para una distancia entre los electrodos de corrientes y el de potencial, donde uno de los electrodos se encuentra a una distancia D y el segundo electrodo de corriente se encuentra a una distancia muy grande del electrodo de voltaje.

$$\begin{aligned}
V &= \int_D^\infty dV \\
&= I\rho \int_D^\infty \frac{dr}{2\pi r^2} \\
&= \frac{I\rho}{2\pi D}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Bajo este mismo principio de cálculo de voltaje, dado un modelo convencional en la práctica de cuatro electrodos (Dos de corriente y Dos de potencial) (Figura 2.7), la diferencia de potencial está dada por:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right) \tag{2.8}$$

donde $r_{C_i P_j}$ es la distancia entre el electrodo “i-esimo” de corriente y el electrodo “j-esimo” de potencial.

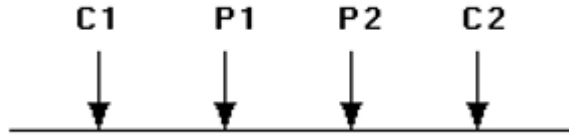


Figura 2.7: Arreglo convencional de cuatro electrodos para métodos eléctricos. C1 y C2: Electrodo de corriente. P1 y P2: Electrodo de medición de potencial

Esta última ecuación, es considerada la ecuación fundamental para el sondaje eléctrico vertical. Para los diferentes arreglos geométricos presentados con anterioridad, se utiliza la ecuación 2.7, dado que se conocen las posiciones de los electrodos de corriente y electrodos de voltaje.

Las mediciones de resistividad se realizan inyectando corriente en el suelo a través de los dos electrodos de corriente (C1 y C2)(Ver Figuras 2.2 y/o 2.7) y se mide la diferencia de potencial eléctrico resultante en dos electrodos de potencial (P1 y P2). A partir de la ecuación 2.8, se calcula una resistividad aparente (ρ_a)

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \tag{2.9}$$

donde

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C_1 P_1}} - \frac{1}{r_{C_2 P_1}} - \frac{1}{r_{C_1 P_2}} + \frac{1}{r_{C_2 P_2}} \right)}$$

k es un factor geométrico que depende de la disposición de los cuatro electrodos. Los instrumentos de medición de resistividad eléctrica automatizados, tipo ERT, normalmente entregan un valor de resistencia $R = \frac{\Delta V}{I}$. Por lo que en la práctica, la resistividad aparente se puede calcular como:

$$\rho_a = kR$$

2.3. Lixiviación

2.3.1. Introducción

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite la extracción de cobre desde minerales que lo contienen aplicando una solución ácida, formada principalmente por una combinación de ácido y agua.

En minería, la lixiviación se desarrolla en pilas, conocidas como pilas de lixiviación. Éstas son terraplenes de gran extensión (600 [m]) y, en algunos casos, de gran altura (200 [m]), compuestos de minerales de cobre oxidados o sulfurados y material ganga. Las pilas son regadas con soluciones ácidas en la parte superior, la cual entra en contacto con los minerales, generándose así una solución rica en cobre hacia la parte inferior de la pila. Esta zona se encuentra impermeabilizada y posee un sistema de colección y drenaje, en donde esta solución, es dirigida hacia la piscina de procesos. De este modo, parte del éxito de la lixiviación en pilas está asociado, entre otros factores, a un flujo vertical adecuado de la solución rica en cobre a través de la pila.

En el presente capítulo, se presentará un marco teórico que permita comprender de mejor manera los alcances de esta investigación, exponiendo los principios fundamentales que gobiernan el proceso de lixiviación en pilas y los factores de los cuales depende el éxito del proceso.

2.3.2. Conceptualización de una pila de lixiviación

Existen diferentes tipos de pilas de lixiviación, y pueden ser clasificadas desde un punto de vista operacional, pilas dinámicas, conocidas también como del tipo “on-off” (en particular, estas son las pilas en las que se basó el presente estudio) y las pilas estáticas o permanentes. Las pilas dinámicas, son aquellas que al finalizar el proceso de lixiviación, son removidas y trasladadas a botaderos.

Las pilas estáticas se construyen y riegan por niveles. En otras palabras, al finalizar el proceso de lixiviación en un nivel, se carga un nivel nuevo sobre el anterior aprovechando (o no) la impermeabilización existente. Esto depende netamente del drenaje de una pila.

Con respecto al sector de apilamiento de una planta, esta cubre una gran área para poder realizar las operaciones correspondiente (movimiento de grúas y otros). El terreno donde se instalará una pila debe tener una pendiente no superior a 5%, con lo cual se asegura la estabilidad de la pila, y nunca inferior a 0,7%, de tal manera que las soluciones fluyan fácilmente hacia el sistema de colección.

La construcción de las pilas se realiza sobre un material granular llamado *cover*. Este material se ubica sobre una geomembrana impermeable de HDPE (*high density polyethylene*) o LLDPE (*linear low density polyethylene*) que evita la infiltración de soluciones al suelo natural. Sobre la geomembrana se ubican tuberías que conforman los sistemas de drenaje y colección de la pila.

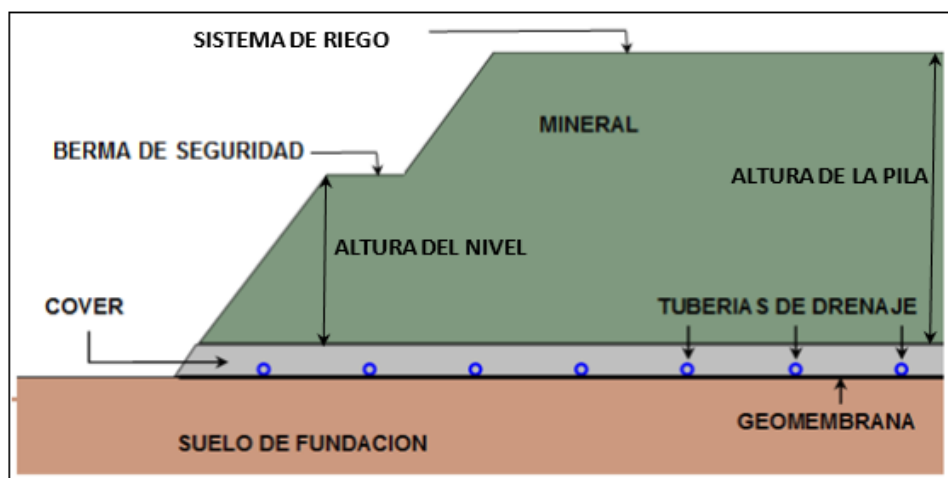


Figura 2.8: Pila de lixiviación, con sus componentes asociados

En la Figura 2.8 se muestran diferentes componentes que forman una pila de lixiviación, a continuación se explicará las funciones de éstas.

- **Sistema de riego:** Sistema por el cual se aplican soluciones ácidas por medio de goteros, aspersores o sistema mixto. Este sistema se ubica en la zona superior de la pila.
- **Mineral:** Material que contiene el mineral de cobre, los cuales pueden ser óxidos o sulfuros.
- **Solución ácida:** Corresponde al agente lixivante. Sus principales componentes son agua y ácido sulfúrico.
- **Sistema de impermeabilización:** Corresponde al sistema encargado de que las soluciones ácidas no escurran hacia el suelo natural. En Chile, se utilizan geomembranas de HDPE o LLDPE.
- **Tuberías de drenaje:** Corresponde a la red de tuberías ranuradas, cuyo fin es mantener controlado el nivel freático dentro de la pila. Además éste transporta las soluciones acuosas hasta el sistema de evacuación.
- **Cover:** Material granular que se ubica sobre el sistema de impermeabilización que puede cumplir algunas o todas las siguientes tareas.
 - a) Actuar como material drenante.
 - b) Proteger la geomembrana.
 - c) Actuar como filtro para las soluciones.
- **Sistema de evacuación:** Se compone por una red de tuberías ranuradas, la cual se encarga de conducir las soluciones hacia afuera de la pila. Está conectada al sistema de drenaje y se ubica en la base de la pila. Luego, las soluciones son conducidas hacia el sistema de recolección externo.
- **Sistema de recolección externo:** Canaleta ubicada fuera de la pila, la cual conduce las soluciones hacia las piscinas de procesos, donde la solución puede ser devuelta o transportada directamente a la planta de extracción por solvente (SX). Es en este punto donde comienza el proceso de extracción del cobre a partir de las soluciones ácidas.

2.3.3. Etapas del proceso de lixiviación en pilas

Para llevar a cabo el proceso de lixiviación en pilas, se debe construir una planta hidrometalúrgica de cobre. En los siguientes acápites, se mostrará como se forman estas pilas.

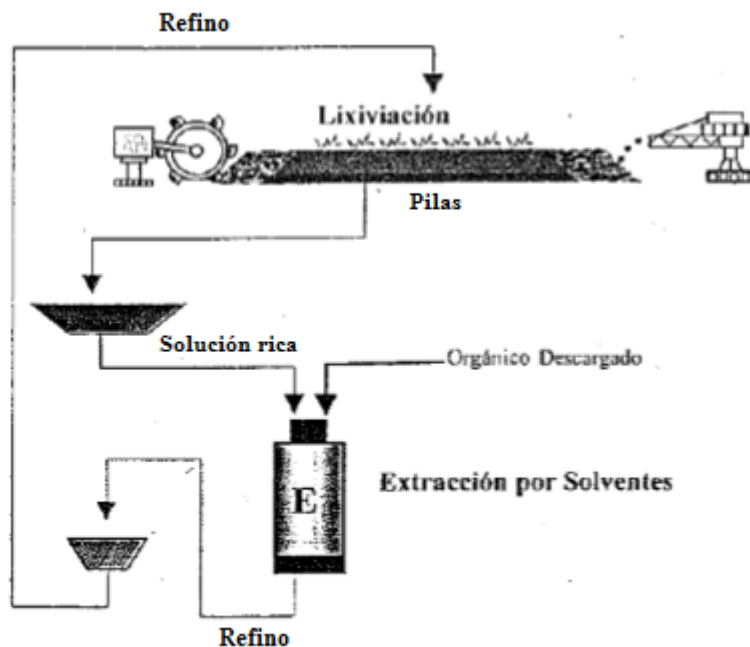


Figura 2.9: Método de riego de un ciclo de lixiviación (López Alfaro, 2012)

La Figura 2.9, muestra la metodología de riego para una pila de lixiviación.

Chancado: Al ser extraído el material con mineral de baja ley (roca con baja presencia de mineral, en este caso, cobre), la primera etapa del proceso es el chancado, esto se hace con el objetivo de triturar la roca y llevarlo a un tamaño granulométrico acorde, es decir, una granulometría que maximice la extracción de cobre por medio de un fluido. El chancado consiste en un proceso de fragmentación de la roca con mineral y consta de varias etapas: chancado primario, secundario y en ocasiones terciario, con el objetivo de obtener un material mineralizado de un tamaño entre $\frac{3}{4}$ " y 2". Estos tamaños son suficientes para dejar expuestas la superficie del mineral a la infiltración de las soluciones ácidas. En términos hidrometalúrgicos, un tamaño granular muy fino, favorece la recuperación de cobre, no obstante, disminuye la permeabilidad de la pila, lo cual afecta el drenaje de ésta y la recuperación de soluciones (Smith y Steemson, 2009).

Aglomeración: Este proceso consiste en la mezcla del material previamente chancado, con ácido sulfúrico y agua, de tal manera que las partículas finas se adhieran entre ellas y con las partículas más gruesas, formando lo que se conoce como glómeros. La cantidad de agua y ácido es fundamental para la cohesión entre partículas, debido a que ayudará directamente a ligar el material fino con el grueso. Dichas cantidades de fluidos dependen netamente de las características del mineral. Schmidt (Schmidt, 2001) enumeró las consideraciones que se deben tener en cuenta para establecer la cantidad de agua y ácido, contenido de los finos, plasticidad de los finos, tamaño de partículas, etc.

Por ejemplo, un exceso de agua produce glómeros muy plásticos y poco estables que son

destruidos con facilidad. Al cargar una pila, se deforman y producen una compactación del mineral antes de iniciar el regado, afectando el drenaje de la pila. Por otro lado, una falta de agua produce glómeros muy débiles mecánicamente y muy esponjosos, lo que produce que al llegar el material a las pilas, el mineral quede con baja densidad, por ende, al regar la pila se produce una gran compactación que puede provocar una canalización durante el proceso de lixiviación. Para el presente estudio, se observará que al tomar los datos de conductividad para la pila sin regar, se puede notar que presenta conductividades relativamente bajas. Esto se puede asociar a que el material de las pilas, presentan un porcentaje entre 5% a 8% aproximadamente de saturación de fluidos, esto se debe en particular al proceso de aglomeración.

Muchos autores han definido que la etapa de aglomeración, es la clave del éxito de una planta lixivadora, esto debido a que esta etapa es la que tiene la misión de lograr un lecho homogéneo y con buena permeabilidad.



Figura 2.10: Foto de glómeros en pila de lixiviación, minera Amalia

En la Figura 2.10, se observan glómeros expuestos en las pilas de la minera Amalia. Estos glómeros son de diferentes tamaños, sin embargo, las pilas se intentan armar de la forma más homogénea posible, pero esto casi nunca ocurre (O’Kane y Wels, 2003).

Lixiviación: Al estar formada la pila, se instalan las mangueras del sistema de riego en la superficie de la pila, que vierten la solución ácida mediante una tasa de riego controlada por un operador externo. Esta solución se infiltra hasta la base produciéndose la extracción del cobre e impurezas del mineral por medio de un intercambio químico. En la base, la solución es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas mediante el sistema de evacuación.

Para el proceso de lixiviación en pilas, existen dos tipos de estas, basadas en un contexto operacional y de construcción. Ambos tipos de pilas, cumplen con la misma funcionalidad. La re-obtención de cobre. Éstas pilas son conocidas como:

- **Pilas Estáticas (multi-lift):** Consiste en un apilamiento de un nivel inicial sobre una superficie impermeable, luego de que dicho nivel ha sido lixiviado aprovechando o no la impermeabilización existente. La geometría de este tipo de pilas, es por lo general rectangular, cuando no existen restricciones topográficas. Donde su altura puede

alcanzar los 200 metros y cada nivel tiene entre 5 a 8 m.

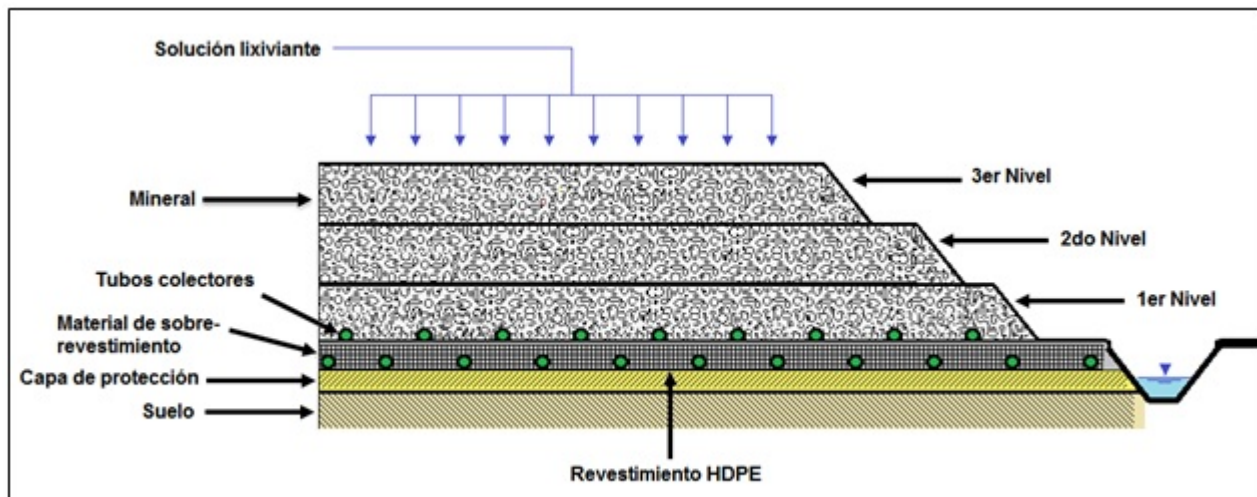


Figura 2.11: Esquema de una pila de lixiviación de tipo estática y sus principales elementos (*hydrometallurgy Perú* 2017)

- **Pilas Dinámicas (on/off):** Este tipo de pilas, “mueren” luego del proceso de lixiviación, en donde se envía a botaderos y la base se puede reutilizar. La geometría de este tipo de pilas, es dependiente de la operación de los equipos de cargas y descargas. En particular para este estudio, se trabajo con este tipo de pilas, con una geometría de 5 metros de alto, 40 metros de largo y 12 metros de ancho.

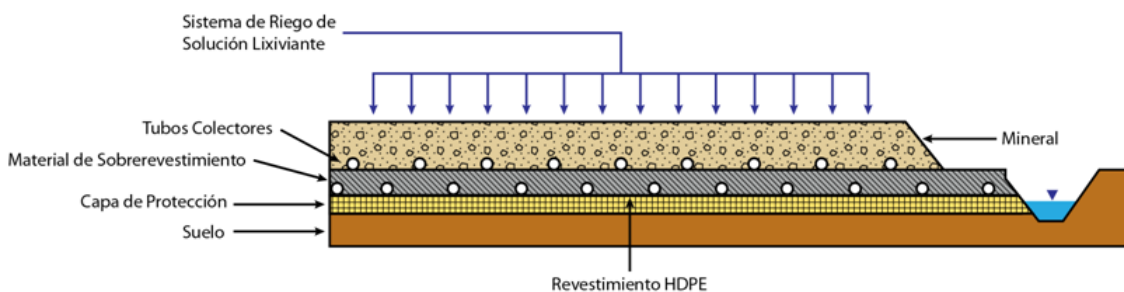


Figura 2.12: Pila de Lixiviación de tipo Dinámica, minera Amalia

2.4. Petrofísica

El objetivo principal de este trabajo, es poder estimar el nivel de saturación de una pila de lixiviación, a partir de conductividades eléctricas. Es decir, tener como variable de entrada un parámetro de resistividad en un punto y entregar como variable de salida, el porcentaje de fluido interno en los poros que presenta este mismo punto. Para alcanzar este objetivo, se conocen dos leyes empíricas que relacionan las variables anteriores en medios porosos. En el

presente capítulo, se explicarán dichas leyes junto a sus variables, y qué ley se utilizará en el presente trabajo.

2.4.1. Porosidad (ϕ)

Medida del volumen de espacios porosos en la roca que tiene la capacidad de almacenar fluidos en cualquier condición (gaseoso o líquido). Este parámetro adimensional se expresa como una medida porcentual entre la razón del volumen de poros (volumen entre granos) con respecto al volumen total (Ecuación 2.10), siendo una medida adimensional.

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_p}{V_p + V_g} \quad (2.10)$$

donde

- ϕ = Porosidad
- V_p = Volumen de Poros
- V_T = Volumen Total
- V_g = Volumen de granos

Cabe destacar que no todo el espacio poroso está disponible para almacenar fluidos, por esta razón cuando se cuantifica el volumen de fluidos móviles, se trabaja con porosidad efectiva (Rojas Suárez, 2011). La comunicación entre poros, esta dada por canales llamados *Gargantas* (Ver Figura 2.13). Existen espacios porosos que no están comunicados entre sí, disminuyendo la cantidad de espacio en que se puede almacenar fluidos.

Dependiendo de cómo sea la comunicación de estos poros, la porosidad se puede clasificar de la siguiente manera:



Figura 2.13: Representación de Porosidades. (Rojas Suárez, 2011)

- **Efectiva o Interconectada:** Porcentaje de poros interconectados mediante gargantas que permiten la circulación de fluidos (fluidos móviles).
- **No efectiva o No interconectada:** Fracción del volumen total de la roca que está conformado por los espacios que pueden contener fluidos, pero no están conectados entre sí.
- **Absoluta o Total:** Se define como la suma de las porosidades anteriores y esta representada por la ecuación 2.11.

$$\phi_{total} = \phi_{Efectiva} + \phi_{NoEfectiva} \quad (2.11)$$

2.4.2. Tasa de vacíos

La tasa de vacíos (e) se define como la razón entre el volumen de vacíos (V_v) y el volumen del sólido (V_s), permitiendo determinar inicialmente que volumen se encuentra en mayor proporción.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.12)$$

En la Tabla 2.1, se muestran algunos valores típicos de porosidades y tasas de vacíos para distintos suelos porosos.

Tabla 2.1: Valores típicos de porosidad y tasa vacío para diferentes materiales granulares (DÍAZ, 2015)

Tipo de suelo	Tasa de vacío, e		Porosidad, ϕ (%)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Materiales granulados: Materiales Uniformes				
Esferas iguales	0.92	0.35	47.6	26.0
Arena limpia y uniforme (fina y media)	1.0	0.4	50	29.2
Materiales granulados: Bien graduado				
Arena gruesa limpia	0.95	0.2	49.0	17.0
Arena, limo y grava	0.85	0.14	46.0	12.0
Suelos mixtos				
Arcillas limosas y arenosas	1.8	0.25	64.0	20.0
Grava bien graduada, arena, limo y mezcla de arcillas	0,70	0,13	41,0	11,0
Suelos arcillosos				
Arcillas (30-50 % tamaño de arcillas)	2.4	0.50	71.0	33.0
Arcillas coloidales (-0,002 mm > 50 %)	1.2	0.60	92.0	37.0

Existe una relación entre la tasa de vacío y la porosidad dada por la ecuación 2.13.

$$e = \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (2.13)$$

o también:

$$\phi = \frac{e}{1 + e} \quad (2.14)$$

2.4.3. Saturación

La saturación de un medio poroso con respecto a un fluido, se definió como la razón entre el volumen total de poros de una roca y el volumen que está ocupado por dicho fluido. Se expresa matemáticamente como:

$$S_x = \frac{V_x}{V_p} \quad (2.15)$$

donde,

$$\begin{aligned} S_x &= \text{Saturación de la fase x} \\ V_x &= \text{Volumen que ocupa la fase x} \\ V_p &= \text{Volumen de Poros} \end{aligned}$$

Para este trabajo, nos interesa estimar la saturación de la solución utilizada en el proceso de lixiviación en pilas a partir de registros eléctricos en formaciones con porosidades intergranulares, y para esto se cuentan con las ecuaciones de Archie y Waxmman-Smits, las cuales serán definidas en la siguiente sección.

Los factores que influyen en la saturación son (Ajewole y Enikanselu, 2014):

- Permeabilidad del sistema
- Área Superficial
- El tamaño de poros

Es decir, a mayor área superficial y menor tamaño de poros, mayor es la saturación de fluido.

Por otro lado, existen diferentes terminologías para hablar de la saturación. Suelo saturado ($S_x = 100\%$, poros llenos de agua) y suelos parcialmente saturados ($S_x < 100\%$, no todos los poros están llenos) (ver Figura 2.14). En mecánicas de suelos, los medios porosos nunca alcanzan una saturación del 0%. Es decir, siempre encontramos poros con una cantidad mínima de fluido (Olguin Coca, 2011).

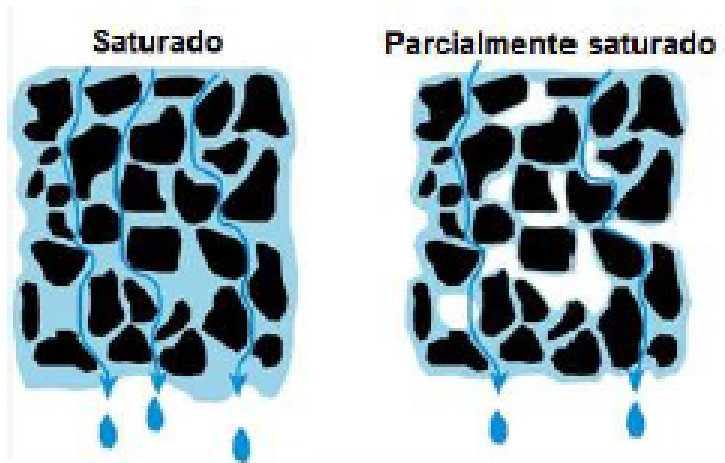


Figura 2.14: Diferencia entre un suelo saturado y parcialmente saturado

2.4.4. Contenido de Humedad ω

Es la relación entre el peso de los sólidos y el peso de la solución líquida confinada en los poros.

Se calcula en porcentaje como:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (2.16)$$

donde W_w es la masa del suelo húmedo y W_s es la masa del suelo seco. El valor teórico del contenido de humedad varía entre: $0 \leq \omega \leq \infty$. En la práctica, la humedad varía de 0 hasta valores mayores al 100% (Olguin Coca, 2011).

Se debe enfatizar que a partir de este valor encontrado de forma experimental (explicado en el siguiente capítulo), se calculará un valor de saturación asociado al contenido de humedad de la muestra.

2.4.5. Factor de tortuosidad (τ)

Para la difusión de un fluido a través de un medio poroso, el fluido no sigue un camino de forma rectilínea, si no más bien, un camino aleatorio entre los poros. Por ejemplo en pilas de lixiviación, se ha visto que el fluido no es homogéneo y no sigue necesariamente la trayectoria en la vertical, si no que presenta irregularidades en su camino.

Para esto, encontramos un elemento que normaliza este cambio de camino del fluido, llamado factor de tortuosidad. Se define como la razón entre la distancia que viaja el fluido (Δl) y el largo del medio (Δx) (Figura 2.15) y su ecuación matemática es:

$$\tau = \frac{\Delta l}{\Delta x} \quad (2.17)$$

Este factor, no puede ser medido directamente, sin embargo la literatura nos entrega aproximaciones para distintos estudios. Por otro lado, la tortuosidad tiene ciertas propiedades.

Por ejemplo:

$$\tau^2 \geq 1$$

significa que el camino real recorrido por el fluido, siempre será mayor o igual a la distancia óptima de flujo (Boudreau, 1996); Segundo.

$$\lim_{\phi \rightarrow 1} \tau = 1$$

Es decir, no hay impedimento para la difusión de fluido en ausencia de sólido (impermeable) (Shen y Chen, 2007). Básicamente, el parámetro de tortuosidad, es dependiente de la porosidad.

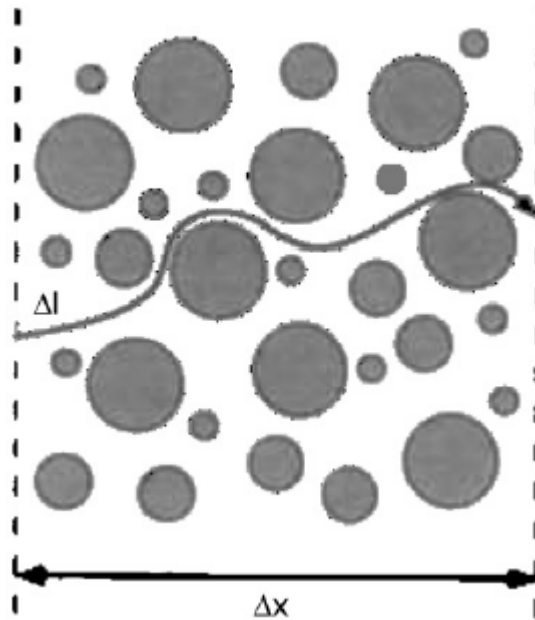


Figura 2.15: Difusión del camino de un fluido en un medio poroso (Shen y Chen, 2007)

2.4.6. Ley de Archie

La ley empírica de Archie, 1942 es la relación más usada para predecir las respuestas efectivas de conductividad eléctrica de materiales geológicos saturados de fluidos (poros saturados al 100 %). Archie, encontró una relación empírica, entre la conductividades (o resistividades) del medio y un fluido que se posa internamente en los poros de este medio saturado.

$$F = \frac{\rho_{eff}}{\rho_w} = \phi^{-m} \quad (2.18)$$

Donde F, representa el factor de formación y es una medida intrínseca de la microgeometría del material, en donde ρ_w representa la resistividad del fluido dentro de las cavidades porosas del material estudiado, mientras que ρ_{eff} representa la resistividad medida in-situ.

El exponente “m”, es conocido como **Factor de Cementación** y se define como un parámetro físico cuantitativo que indica el grado de unión de la formación del medio estratificado

(Ajewole y Enikanselu, 2014). Se designó factor de cementación, al observar que m era más alto en las rocas cementadas. En la Tabla 2.2 se ven múltiples valores del factor de cementación, encontrados por diferentes autores. En esta misma, se puede apreciar que el mismo material, estudiado por distintos autores, concluyen un valor cementación m diferente.

Tabla 2.2: Valores del exponente de Archie (m) para diferentes materiales consolidados y no consolidados estudiado por múltiples autores

Tipo de suelo	Porosidad ϕ	m	Referencia
Clean sand	0.12-0.40	1.3	Archie, 1942
Arenisca consolidada	0.12-0.35	1.8-2.0	
Esfera cristalinas	0.37-0.40	1.38	Wyllie y Gregory, 1955
binary sphere mixtures	0.147-0.29	1.31	
cylinders	0.33-0.43	1.47	
disks	0.34-0.45	1.46	
cubes	0.19-0.43	1.47	
prisms	0.36-0.52	1.63	
8 marine sands	0.35-0.50	1.39-1.58	Jackson et al., 1978
glass beads (spheres)	0.33-0.37	1.20	
quartz sand	0.32-0.44	1.43	
rounded quartz sand	0.36-0.44	1.40	
shaley sand	0.41-0.48	1.52	
shell fragments	0.62-0.72	1.85	
fused glass beads	0.02-0.38	1.50	Sen, 1981
fused glass beads	0.10-0.40	1.7	Schwartz y Kimminau, 1987
sandstone	0.05-0.22	1.9-3.7	Doyen, 1988
polydisperse glass beads	0.13-0.40	1.28-1.40	De Kuijper et al., 1996
fused glass beads	0.10-0.30	1.6-1.8	
sandstones	0.07-0.22	1.6-2.0	
limestones	0.15-0.29	1.9-2.3	
Bulgarian altered tuff	0.15-0.39	2.4-3.3	Revil et al., 2002
Mexican altered tuff	0.50	4.4	
glass beads	0.38-0.40	1.35	Friedman y Robinson, 2002
quartz sand	0.40-0.44	1.45	
tuff particles	0.60-0.64	1.66	

Por ende, el valor de m tiene muchas variables asociadas que hacen que su valor sea distinto dependiendo del material y su consolidaciones. En el capítulo de resultados, se mostrará como reacciona el valor de m a cambios en las variables de la ecuación de Archie.

La ley de Archie, implícitamente supone que la porosidad total es igual a la porosidad efectiva, y que toda la conducción eléctrica en una roca o suelo saturado de fluido resulta de la migración de iones en la solución de poros en masa (Lesmes y Friedman, 2005).

Por otra parte, Archie, encontró que el logaritmo del factor de formación (ecuación 2.18) es inversamente proporcional al logaritmo del grado de saturación de un fluido (S_w) para un medio Sub-Saturado. Encotrando una nueva relación entre parámetros petrofísicos.

$$S_w^n = \frac{F\rho_w}{\rho_{eff}} \quad (2.19)$$

Winsauer et al., 1952 modificó la formulación de Archie (Ecuación 2.19), introduciendo el factor de tortuosidad (τ) dentro de la relación de porosidad y factor de formación, entregando para estudios futuros, la ecuación final 2.20.

$$S_w^n = \frac{\tau \phi^{-m}}{F} = \frac{\tau \phi^{-m} \rho_w}{\rho_{eff}} \quad (2.20)$$

El exponente de la saturación (n) (Ecuación 2.20), es conocido como factor de saturación. Tanto este factor como el de cementación (m), son parámetros que se adecuan a la ley de Archie y no son elementos propios de los materiales, sino que es para encontrar una relación logarítmica entre el factor de formación con la porosidad o saturación. En la Tabla 2.3, se observa una relación entre la densidad, el factor de formación y el factor de saturación, donde se ve que este último no solo depende del tipo de material, sino que también de su densidad.

En general, el índice de saturación es mayor que el de cementación ($n > m$). Esto se debe a un comportamiento entre el camino del fluido y la porosidad del medio. (Lesmes y Friedman, 2005).

2.4.7. Ley de Waxman-Smits

En la subsección anterior(2.4.2), se definió los efectos de saturación en la conductividad, respondiendo a la consolidación del material. Archie, observa que la conductividad aumenta con la saturación acorde a la relación empírica:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_w S^n \phi^m}{\tau} \quad (2.21)$$

Para materiales parcialmente saturados. Waxman y Smits, 1968 también estudiaron los efectos de la saturación sobre la conductividad eléctrica, específicamente en materiales geológicos que contengan petróleo en zonas porosas, sin embargo, Waxman-Smits considera una conductividad superficial del material. Es decir que se tiene en cuenta un intercambio de catión entre el fluido y la superficie del material para materiales arcillosos (Onovughe y Sofolabo, 2016).

Waxman-Smits comienza con la ecuación 2.21, pero reemplaza la conductividad del fluido (σ_w) por $\sigma_w + \sigma_e$, tomando en cuenta la conductividad de la zona superficial del material unida al fluido. Donde σ_e es la conductividad del material poroso en su superficie, y σ_w es la conductividad del fluido, expuesta con anterioridad. Por ende la ecuación 2.21 queda como:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_w S^n \phi^m}{\tau} (\sigma_w + \sigma_e) \quad (2.22)$$

donde:

$$\sigma_e = \frac{BQ_v}{S_w} \quad (2.23)$$

B representa la conductancia iónica equivalente de iones en el intercambio con el material granular. Este valor depende del materia, la salinidad del fluido y temperatura (Onovughe y Sofolabo, 2016). Sus unidades se expresan en $\frac{mho \cdot cm^2}{mEq}$ (1 mho es una unidad de conductancia, puede representarse como 1/Ohm). Mientras que Q_v es la capacidad de intercambio de cationes entre la solución y la zona superficial del grano y sus unidades son mEq/ml , medida como la razón ente capacidad de intercambio catiónico (mEq)y volumen de poro ($[L]^3$).

Reemplazando 2.23 en 2.22, encontramos el modelo descrito por Waxman-Smits.

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_w S^n \phi^m}{\tau} \left(\sigma_w + \frac{BQ_v}{S_w} \right) \quad (2.24)$$

Cuando la contribución de la arcilla es despreciable (sin conductividad eléctrica superficial), hay que señalar que la ecuación de Archie, domina por sobre el modelo de Waxman-Smits (Seladji et al., 2010).

La conductividad superficial $\left(\frac{BQ_v}{S_w} \right)$ incrementa con el decrecimiento de la saturación y disminuye además con el tamaño del grano cuando es más pequeño. Waxman y Smits lo atribuyeron a un incremento en el volumen de concentración del material geológico debido a un bajo intercambio de cationes en medio sub-saturados.

En conclusión, los valores esperados a encontrar en los resultados de laboratorio efectuados por el autor del presente trabajo, deberían estar en los rangos indicados por las Tablas 2.3 y 2.2.

Tabla 2.3: Tabla de valores invertidos del modelo de Waxman-Smits para la superficie de contacto del grano con el fluido. (Seladji et al., 2010)

Tipo de suelo	Densidad [$\frac{g}{cm^3}$]	Conductividad Superficial [$\frac{S}{m}$]	Factor de saturación n	Factor de formación F	RMS
Limo	1.1	$2.51 \cdot 10^{-2}$	2.47	0.67	1.249
	1.3	$1.02 \cdot 10^{-3}$	1.95	0.67	0.819
	1.6	$7.21 \cdot 10^{-4}$	1.53	1.07	0.492
Arcilla	1.1	$1.46 \cdot 10^{-2}$	1.95	0.67	2.204
	1.3	$7.47 \cdot 10^{-4}$	1.88	0.62	3.353
	1.6	$5.29 \cdot 10^{-4}$	2.05	0.78	0.919
Limo Profundo	1.1	$1.22 \cdot 10^{-3}$	2.70	1.47	1.284
	1.3	$4.30 \cdot 10^{-3}$	2.81	2.30	1.056
	1.6	$2.99 \cdot 10^{-3}$	3.12	8.19	0.396
Limo a poco profundidad con material orgánico	1.1	$3.20 \cdot 10^{-4}$	2.79	2.38	0.972
	1.3	$3.52 \cdot 10^{-4}$	2.60	3.59	0.897
	1.6	$1.55 \cdot 10^{-3}$	2.70	7.46	0.666

2.4.8. Selección del Modelo adecuado a utilizar, ¿Waxman-Smits o Archie?

Como objetivo principal del presente trabajo, se quiere estimar el grado de saturación que posee internamente la pila de lixiviación a partir de conductividades eléctricas. No obstante, como se vio con anterioridad, se cuenta con dos modelos para estimar este problema. Archie, 1942 y Waxman y Smits, 1968. Pero, ¿Cuál de ellos entregará una respuesta satisfactoria a las necesidades del presente trabajo?

Según la literatura, ambos modelos empíricos, muestran buenos resultados a la hora de estimar alguna variable petrofísica. Sin embargo, no se encontró una forma óptima de poder estimar el el valor numérico que provoca el intercambio iónico entre la matriz de grano y el fluido. En síntesis, el modelo a utilizar para estimar la saturación a partir de resistividades eléctricas será el expuesto por Archie (Ecuación 2.20).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Introducción

Para poder crear una sección 2D de saturación en una pila de lixiviación real, primero hubo que adquirir datos de resistividad en terreno, sobre la pila de lixiviación. Posteriormente, estimar los parámetros del modelo de Archie, a través de un procedimiento en laboratorio. En el presente capítulo, se explicará la metodología de adquisición, instrumentación e inversión de los datos obtenidos tanto en terreno como en laboratorio.

Antes de poner en marcha la adquisición de datos en laboratorio con el material proveniente de una pila de lixiviación real, hubo un ensayo con otro tipo de material sólido (Tierra común del campus Beauchef, Universidad de Chile) y agua común como fluido, con el objetivo de saber si el montaje en laboratorio funcionaba como se esperaba, y también que los resultados estuvieran acorde con lo que indicaba la literatura. En este experimento de prueba, se concluye que los datos obtenidos y el montaje de laboratorio muestran resultados óptimos, por lo cual se prosiguió con muestras provenientes de una pila de lixiviación real y una solución de agua destilada con ácido sulfúrico como fluido lixivante (En el apéndiceB se detalla la elaboración de esta solución).

3.2. Toma de datos en la pila de lixiviación real

Para evaluar cuantitativamente y cualitativamente los elementos y parámetros de los objetivos, se realizaron experimentos sobre una pila de lixiviación. Dichos experimentos consideran la medición directa en superficie de la resistividad por estructuras de la pila. En base a estas respuestas medidas en superficie, se intenta recuperar mediante un proceso de inversión estructuras de resistividad en profundidad, obteniendo así un mapa de dos dimensiones de las resistividades en una sección de pila.

En el mes de Enero del año 2017, se tomaron datos de ERT en la pila de lixiviación número 11, módulo 2, en el sector de pilas dinámicas de la planta. El módulo en cuestión tiene un área superficial de 40 [m] x 12 [m] y un espesor aproximado de 5 [m]. Se desplegaron cinco líneas de medición a lo largo de la pila, abarcando 40 metros separados entre sí por 2 metros (Figura 3.1).

Estas secciones de resistividad, serán las variables de entrada en el modelo de Archie, para poder estimar el porcentaje de saturación de una sección de la pila de lixiviación.

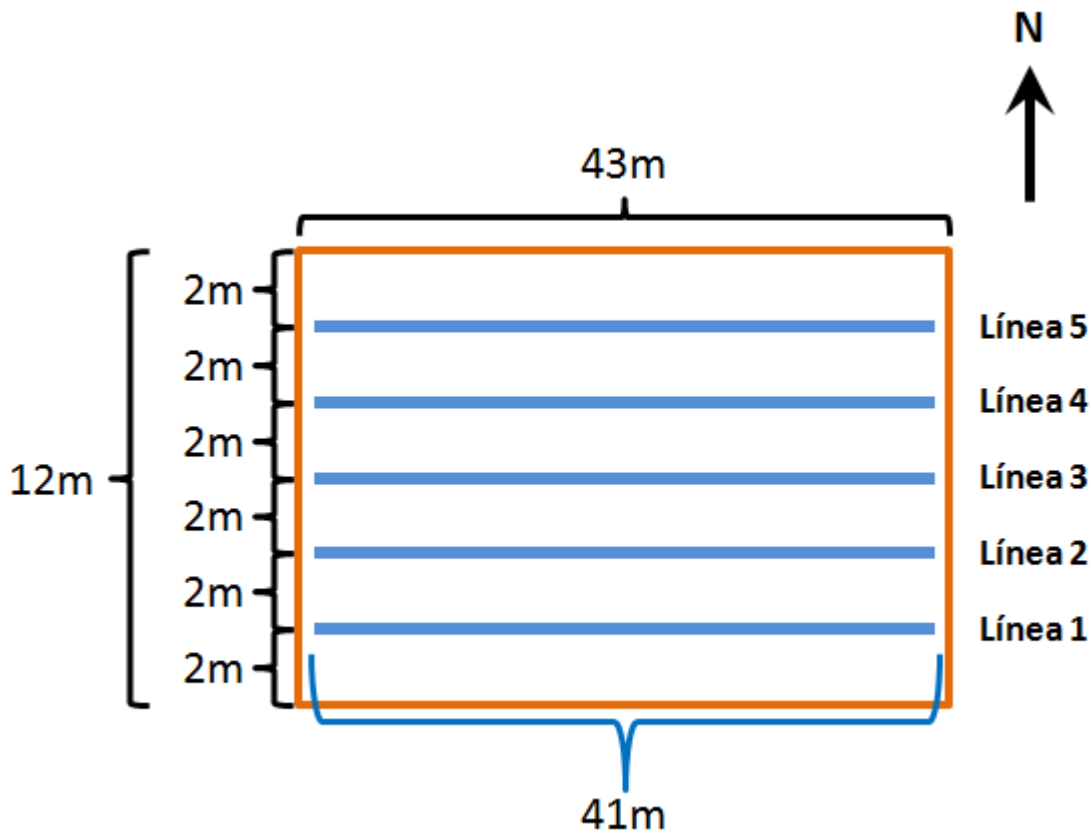


Figura 3.1: Esquema de líneas de medición en pila dinámica, módulo 11B. Separación entre ellas de 2 metros.

3.2.1. Equipo de adquisición de datos

El equipo y accesorio utilizado en la adquisición para los datos de resistividades eléctricas fue el siguiente:

Equipo Iris Syscal Pro Switch 48: Equipo que combina receptor, transmisor y consola de operaciones de 48 canales. Realiza y coordina la inyección de corriente y simultáneamente recibe señales de voltaje, a partir de las cuales realiza la determinación de resistividades aparentes para las distintas combinaciones de transmisión-recepción bajo los parámetros que el operador configure y estime adecuado (Figura 3.2).

Cable multielectrodo: Dos cables con 24 salidas de electrodos. Tanto la transmisión de corriente como la recepción de señales de voltaje, son responsabilidad de este cable.

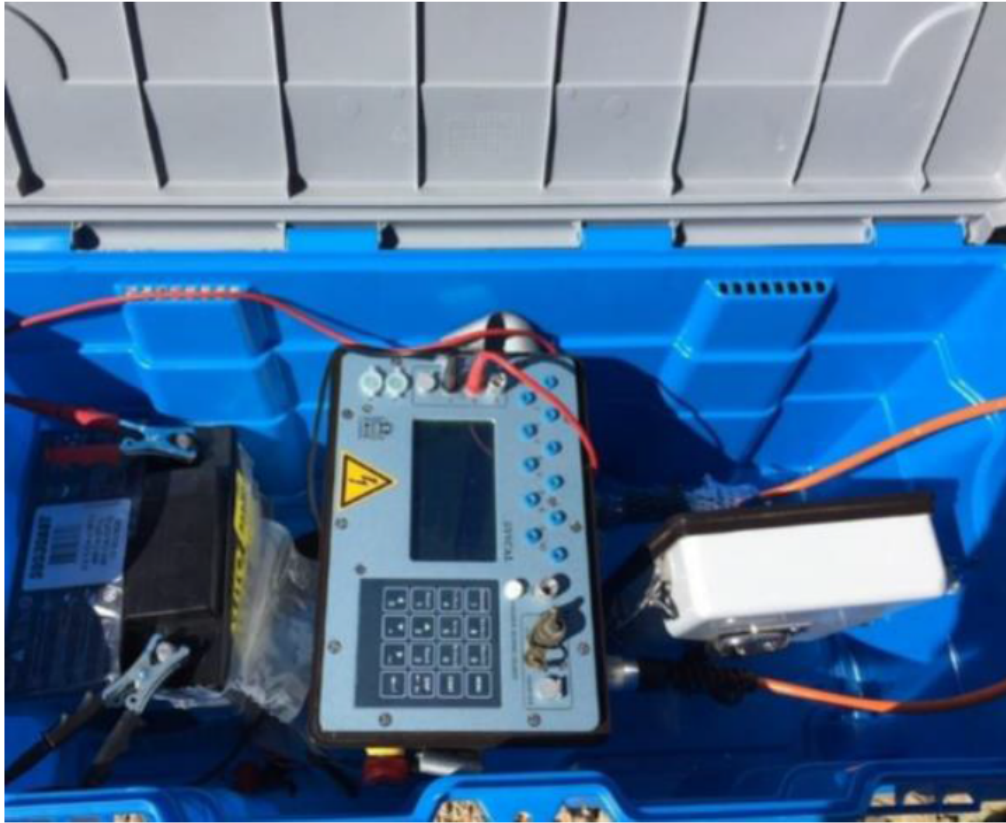


Figura 3.2: Equipo de ERT Syscal Pro Switch 48

3.2.2. Metodología de Inversión para tomografía de resistividad eléctrica

Para recuperar la conductividad eléctrica en la horizontal y profundidad ($x; z$), realizamos una inversión para un problema no lineal. Problema que requiere una linealización de las ecuaciones de datos y las etapas de iteraciones posteriores (McGillivray, 1992).

En la metodología para linealizar este problema, es conveniente introducir una notación para los datos obtenidos de forma discreta dada por $d = (d_1, d_2, \dots, d_M)^T$ que denota los datos en la componente i -ésima para la resistividad aparente.

El vector $m = (m_1, m_2, \dots, m_N)$ es el modelo al problema inverso que reproduce los valores de observaciones. El valor m_j denota la conductividad para la celda j -ésima. Para linealizar la formulación inversa denotamos $m_j = \ln(\sigma_j)$.

Podemos re-formular la ecuación inversa, para una linealización invirtiéndose por medio

de la ecuación 3.1. Es decir, estamos invirtiendo un problema lineal iterativamente.

$$Gm = d \tag{3.1}$$

Donde G es una matriz linealmente independiente en sus valores, conocida como *Matriz de Green* de tamaño $M \times N$ (Ellis y Oldenburg, 1994).

Para poder encontrar un modelo real de conductividades, introducimos un ajuste de criterio comúnmente utilizado, conocido como el vector residual, el cual es la diferencia entre las observaciones y el modelo predicho (Tarantola, 2005) con norma l_p :

$$\psi_d = \|W_d (Gm - d)\|^p \tag{3.2}$$

W_d es la matriz de peso para los datos. Es importante destacar, que los datos están contaminados con ruido aleatorio Gaussiano con un promedio de cero y desviación estándar ε_i . La matriz de peso W_d , es una matriz cuadrada de dimensiones $M \times M$ y se define como una matriz diagonal $W_d = \text{diag} \{1/\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_M\}$.

La norma que utiliza este software, es norma l_2 , es decir, la ecuación 3.2, la llevamos a:

$$\psi_d = \|W_d (Gm - d)\|^2 \tag{3.3}$$

la cual, ahora es una regresión lineal de mínimos cuadrados. La solución de mínimos cuadrados o norma l_2 es de especial interés tanto porque es fácilmente susceptible de análisis e intuición geométrica, porque resulta ser estadísticamente la solución más probable si los errores de datos son normalmente distribuido (Tarantola, 2005).

Se escoge ψ_d como una variable aleatoria distribuida en chi-cuadrado (χ^2) con M grados de libertad, dado por la ecuación 3.4.

A partir de la ecuación 3.3, ψ_d se selecciona como una variable aleatoria con M grados de libertad distribuida en chi-cuadrado (χ^2).

$$\begin{aligned}
\chi_d^2 &= \psi_d \\
&= \sum_{i=1}^M (d_i - (Gm_{l2})_i)^2 / \sigma_i^2 \\
&= \sum_{i=1}^M W_d((d_i - (Gm_{l2})_i)^2)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

La suma de los cuadrados de los residuos también proporciona información estadística útil sobre la calidad de las estimaciones, modelo obtenido con mínimos cuadrados (χ^2), donde la estadística para este residuo es la ecuación 3.4.

Es común utilizar la norma l_2 , sin embargo Huber, 1964 incorporó una forma atípica de manejo de datos, dado por la forma:

$$\tau(y) = \begin{cases} y^2 & |y| \leq c \\ 2c|y| - c^2 & |y| > c \end{cases} \tag{3.5}$$

Para la ecuación 3.5, sustituimos $y = W_d(Gm - d)$ y los datos desajustados para una nueva función esta dada por:

$$\psi_d = \sum_{i=1}^n \begin{cases} [W_d^i(G_i m - d_i)]^2 & |y_i| \leq c \\ 2c|W_d^i(G_i m - d_i)| - c^2 & |y_i| > c \end{cases} \tag{3.6}$$

donde c es una constante que separa los elementos del vector y y en aquellos que se consideran grandes o pequeños (Farquharson y Oldenburg, 1998).

Las distribuciones de conductividades del subsuelo son complejas. Para permitir el máximo aprovechamiento del modelo en forma arbitraria, es importante que M , el número de celdas que representa el modelo, sea grande. En la inversión, M será casi siempre mayor que N , el número de datos. Por lo tanto el problema se reduce a un conjunto de parámetros de modelo M usando sólo N restricciones de datos bajo la condición que $M > N$. Uno de los problemas de las inversiones, es que la solución no es única.

Al funcionar un algoritmo de inversión, creará un modelo que reproduce los datos, pero existen infinitas posibilidades. Entonces ¿cuál es el modelo que sirve? La información a priori que se tiene, es la que definirá, si el modelo es consecuente con lo que se sabe. Es decir, se

espera que el software, represente un modelo que es geológicamente razonable y está limitado por información adicional si dicha información esta disponible. Esto se puede implementar, formulando una función objetivo del modelo, que cuando se minimiza, produce un modelo con características deseables.

En el algoritmo de inversión para el software DCIP2D, se escoge una función objetivo ψ_m que es guiada por el deseo de encontrar un modelo que tenga una estructuración mínima en las direcciones verticales y horizontales, lo más parecido a los datos observados, basados en un modelo de referencia m_0 . Para lograr esto, se minimiza una discretización aproximada, dada por:

$$\begin{aligned} \psi_m(m, m_0) = & \alpha_s \iint W_s(x, z)(m - m_0)^2 dx dz + \\ & \iint \left\{ \alpha_x W_x(x, z) \left(\frac{\partial(m - m_0)}{\partial x} \right)^2 + \alpha_z W_z(x, z) \left(\frac{\partial(m - m_0)}{\partial z} \right)^2 \right\} dx dz \end{aligned} \quad (3.7)$$

En la ecuación 3.7, las funciones W_s , W_x , W_z son las matrices de pesos representando las desviación estándar del modelo (W_s), horizontal (W_x) y vertical (W_z), pero definidas por el usuario del software. Por otro lado, α_s es una constante que controlan la cercanía del modelo de de referencia m_0 , α_x , α_z controla la suavidad del modelo en la horizontal y vertical respectivamente. Variando la razón entre α_x/α_z , permite la construcción de modelos que serán suaves, por lo tanto más alargados en las diferentes direcciones.

Discretizando la ecuación 3.7 de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \psi_m &= (m - m_0)^T \{ \alpha_s W_s^T W_s + \alpha_x W_x^T W_x + \alpha_z W_z^T W_z \} \\ &= (m - m_0)^T W_m^T W_m (m - m_0)^T \\ &= \|W_m(m - m_0)\|^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

En resumen, el problema inverso se formula como un problema de optimización:

$$\begin{aligned} \min(\psi_m(m, m_0)) &= \|W_m(m - m_0)\|^2 \\ \text{sujeeto : } & \|W_d(d - d^{obs})\| = \psi_d \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.2.3. Procesamiento e Inversión de Datos en terreno

Para poder invertir los datos, estos se deben filtrar de alguna manera, evitando valores eléctricos irreales. Para llevar a cabo un procesamiento de datos eficiente, se lleva a cabo en las siguientes etapas.

Filtrado de Datos: En este primer proceso, se eliminan datos que no están en concordancia con lo esperado, por ejemplos valores con un gran error asociado, o simplemente voltajes negativos.

Generar mapa de datos Observados o Pseudosección: En este proceso, se observan las resistividades aparentes de las mediciones. En la Figura 3.3 se observan los puntos medidos para todas las combinaciones posibles para un equipo de ERT. Se puede observar en esta misma Figura, puntos eliminados, esto se debe a su gran error que en su mayoría, se presentan en profundidades o simplemente a valores negativos de voltajes. Cabe destacar que tanto las profundidades como la resistividades en estos mapas, no corresponden a los valores reales, sino más bien a un referencia inicial que funciona como una herramienta de visualización de los datos previos a la inversión. Sin embargo, este gráfico de observaciones, nos puede dar una primera idea de como están los datos.

Inversión: Para el proceso de inversión, se utiliza el Software DCIP2D 3.2v, con el cual se quiere generar un modelo de resistividades. El algoritmo matemático de inversión para estimar el modelo de resistividad, fue explicado en la sección anterior.

Generar modelo de Resistividades: Luego de invertir las resistividades aparentes, se genera un modelo en dos dimensiones, con valores de resistividades creando formas en profundidad y en la horizontal que intenta replicar la realidad en el sub-suelo de la superficie de la pila. La Figura 3.4 muestra un modelo inverso de resistividades para la pila estudiada a partir de las resistividades aparentes mostradas en la Figura 3.3.

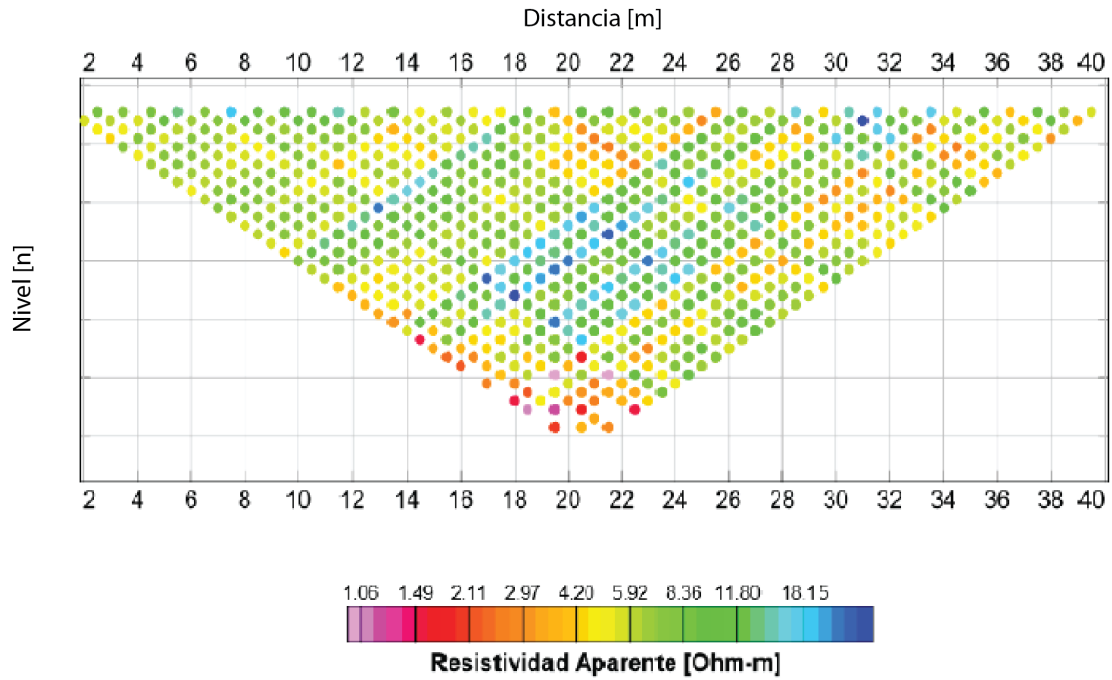


Figura 3.3: Ejemplo Pseudosecciones de resistividad aparente. Eje vertical no muestra valores de profundidad, dado que este eje, no representa una profundidad real.

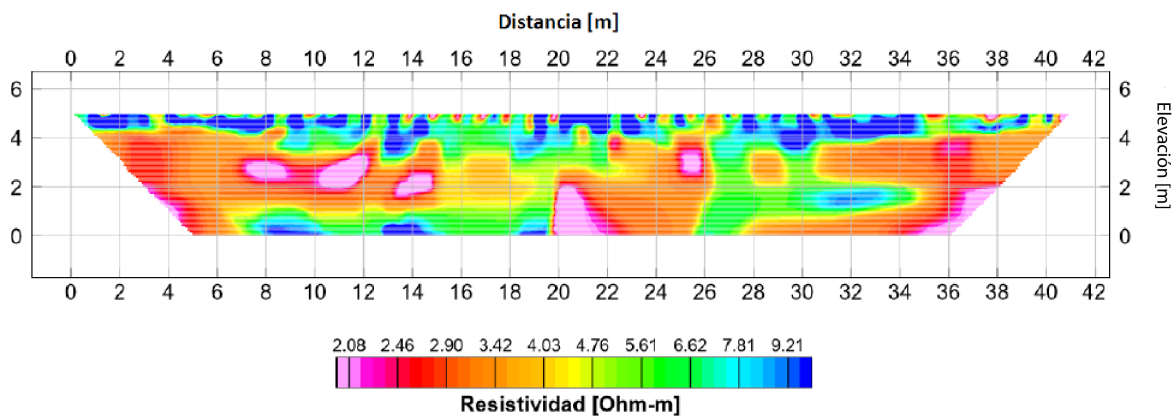


Figura 3.4: Ejemplo sección de resistividades 2D para una pila de lixiviación real

3.3. Experimentación Petrofísica en laboratorio

3.3.1. Objetivo del experimento

Para poder cumplir con el objetivo general del presente trabajo, se utilizará el modelo empírico de Archie (Ecuación 2.20) vista en el capítulo anterior. Desacoplando las variables involucradas y aplicando logaritmo en base 10 a la Ecuación 2.20, podemos escribir el factor de formación en función de la saturación:

$$\log\left(\frac{F}{\tau}\right) = -n\log(S_w) - m\log(\phi) \quad (3.10)$$

Donde se sabe que la ecuación anterior (3.10) sigue una tendencia lineal entre el logaritmo del factor de formación ($F = \frac{\rho_{eff}}{\rho_w}$) y logaritmo del grado de saturación con una pendiente de valor $-n$ (Lyle y Mills, 1989). El fin de esta experimentación, es poder estimar los exponentes de Archie, por medio de una inversión con norma l_2 , para poder modelar el grado de saturación en una pila de lixiviación real.

3.3.2. Instrumentos de Laboratorios y Montaje del Experimento

Se comenzó creando un recipiente adecuado para el experimento, que contuviera los elementos necesarios para poder medir la resistividad y saturación (Figura 3.5).

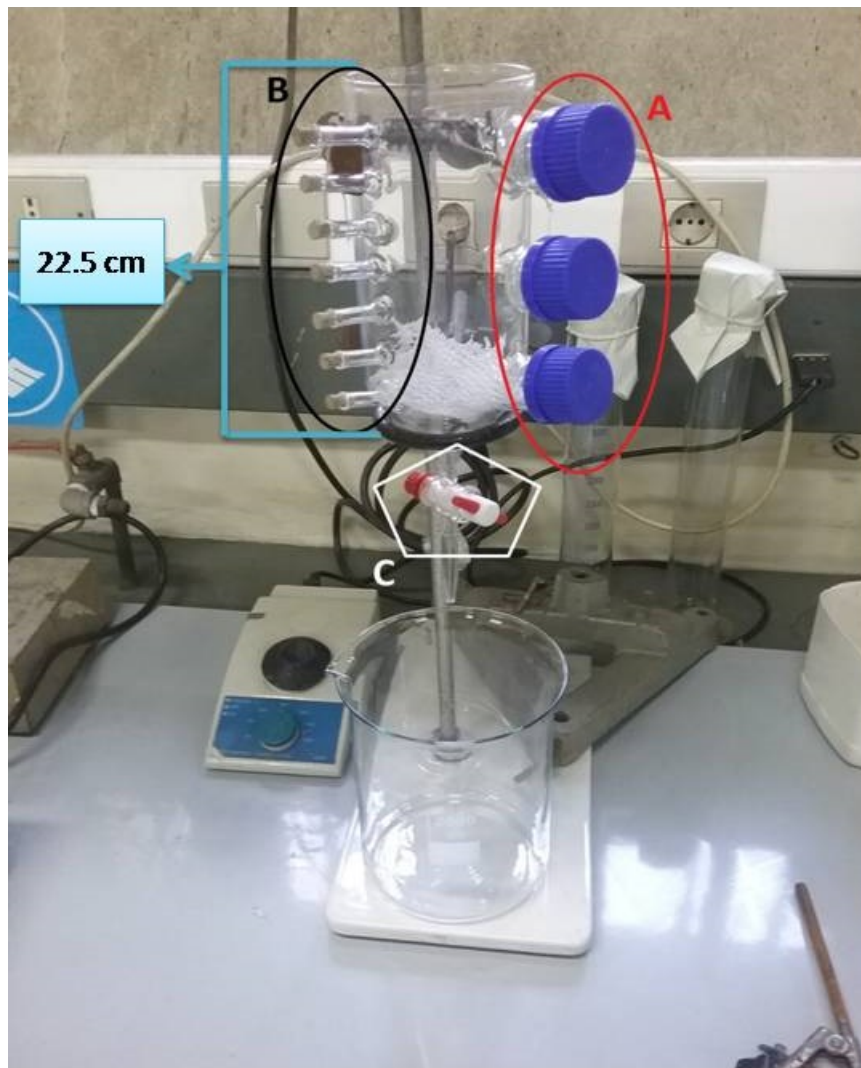


Figura 3.5: Recipiente utilizado para experimentación petrofísica en laboratorio con condiciones controladas. Ovalo rojo (A): orificios para introducción de conductivímetro. Ovalo negro (B): orificios para introducción de electrodos de inyección de corriente y medición de voltaje para medición con el método SEV. Pentágono blanco (C): Pasador de fluido

El objetivo de este instrumento creado especialmente para este laboratorio, es introducir cierta cantidad de masa sólida granulada en el interior de éste, hidratar el material con fluido y finalmente vaciar el fluido por el pasador de agua **C**. Luego de estar el material hidratado, se mide la conductividad del material por medio de un conductivímetro, que se introduce por algún agujero **A** (En las experimentaciones, el conductivímetro no entregó valores coherentes de conductividad, así que estos datos no influenciaron en los resultados finales de esta tesis). Por otro lado, se mide la resistividad a través del método geofísico, SEV, donde los electrodos, hacían contacto con la muestra por medio de los agujeros **B**. Este procedimiento será explicado en la próxima sección (Ver Figura 3.5). Los orificios de **B**, están equiespaciados entre ellos por una distancia de 2.1 [cm]. Esta distancia entre orificios, es muy importante, para poder definir el valor del coeficiente geométrico del arreglo para SEV.

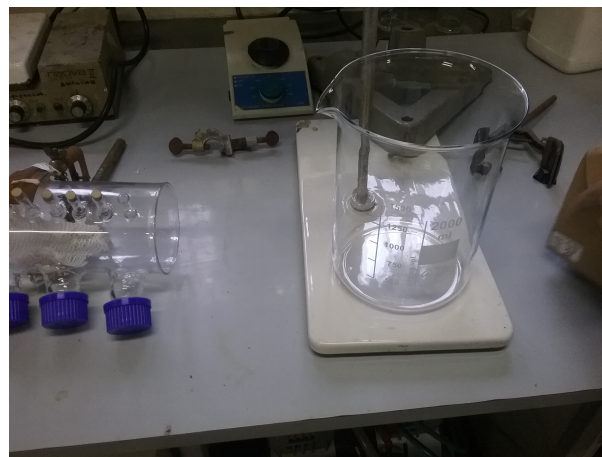
Se utilizaron instrumentos clásicos de experimentaciones en laboratorios, tales como: vaso precipitado (Figura 3.6.(C)); pesa de 0.01 [g] de sensibilidad (Figura 3.6.(A)); probeta (Figura 3.6.(A)); agua destilada; horno para secado de muestras (Figura 3.9), entre otros, teniendo como función principal, entregar las medidas y unidades necesarias para relacionar los conceptos de la mecánica de suelos que se quiere estudiar.



(a) Pesa de 0.01(g) de sensibilidad



(b) Probetas de 700 ml de capacidad



(c) Vaso precipitado de 2000 ml de capacidad

Figura 3.6: Instrumentos de Laboratorio

Como se mencionó en el capítulo anterior, en los experimentos de laboratorio se montó un Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) para poder conocer la resistividad del medio humectado. Para poder llevar a cabo la inyección de corriente por medio del método SEV, se cuenta con los siguientes materiales:

- **Baterías de 12 [V]:** Inductor de corriente.
- **Cables de corrientes:** Cables conductores de corriente, desde la batería hasta clavos.
- **Clavos de 4”:** Clavos introducidos en los orificios **B** (ver Figura 3.5).
- **Voltímetro/Amperímetro:** Instrumento UT58 SERIES, con las opciones de medir voltaje, amperaje, resistencia.

Al conocer la distancia entre electrodos para la inyección de corriente, se calcula el factor geométrico del arreglo a usar. Para todas las experimentaciones, se utilizó el arreglo *Wenner*. No obstante, el arreglo *Wenner* y todos los arreglos en este tipo de método Galvánicos, tiene como hipótesis la adquisición de datos eléctricos en un semiespacio, lo que provoca la interrogante del valor efectivo del factor geométrico, y como consecuencia, el valor de resistividad medidas en laboratorio. Dicho cuestionamiento, radica en la geometría del vaso experimental, ya que es un espacio finito de poca extensión.

De todos modos, se consideró el calculo del factor geométrico según el arreglo *Wenner* y esta última interrogante queda abierta a nuevas experimentaciones e hipótesis.

Finalmente, al obtener la corriente y el voltaje, se utiliza la ecuación vista en el capítulo anterior para el cálculo de la resistividad aparente (Ecuación 2.9).

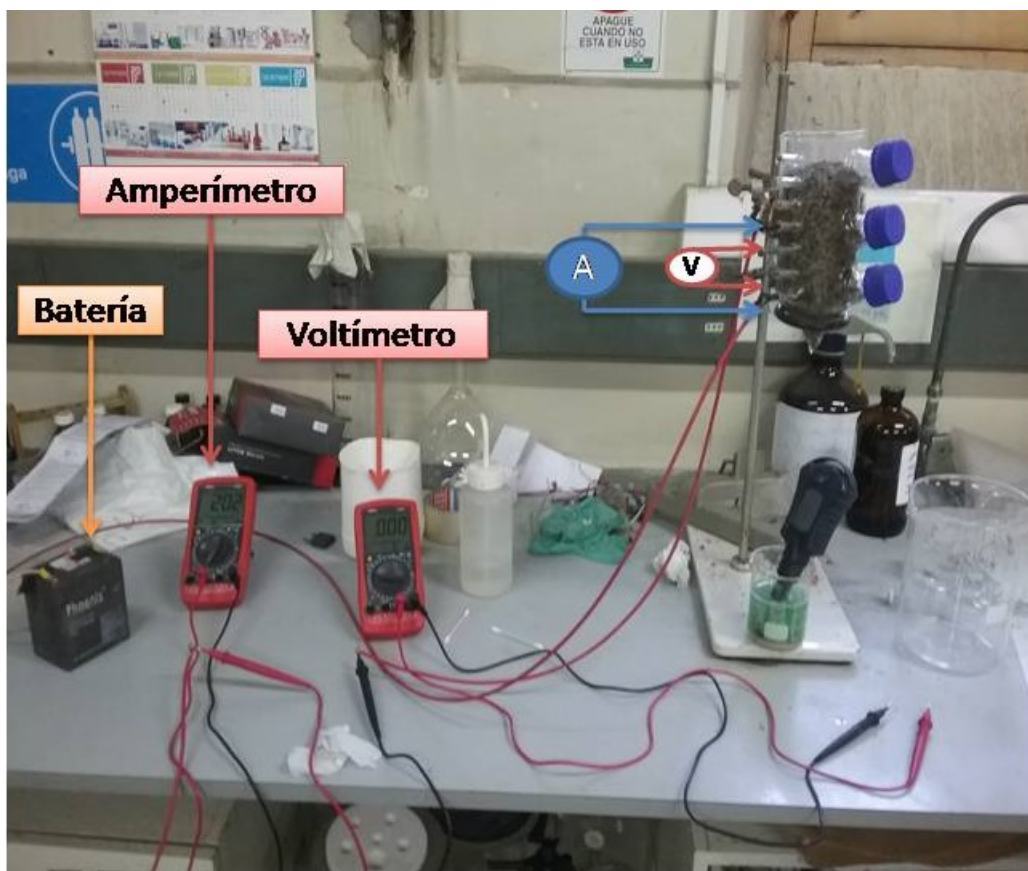


Figura 3.7: Instrumentos de inyección de corriente en vaso experimental. Circulo azul **A**: Inyección de corriente. Circulo rojo **V**: Medida de diferencia de potencial. Arreglo Wenner

La Figura 3.7 muestra la conexión básica para la inyección de corriente en el vaso experimental. En el siguiente capítulo se explicará la metodología de adquisición de datos en laboratorio y la figura 3.8 es un esquema del montaje experimental.

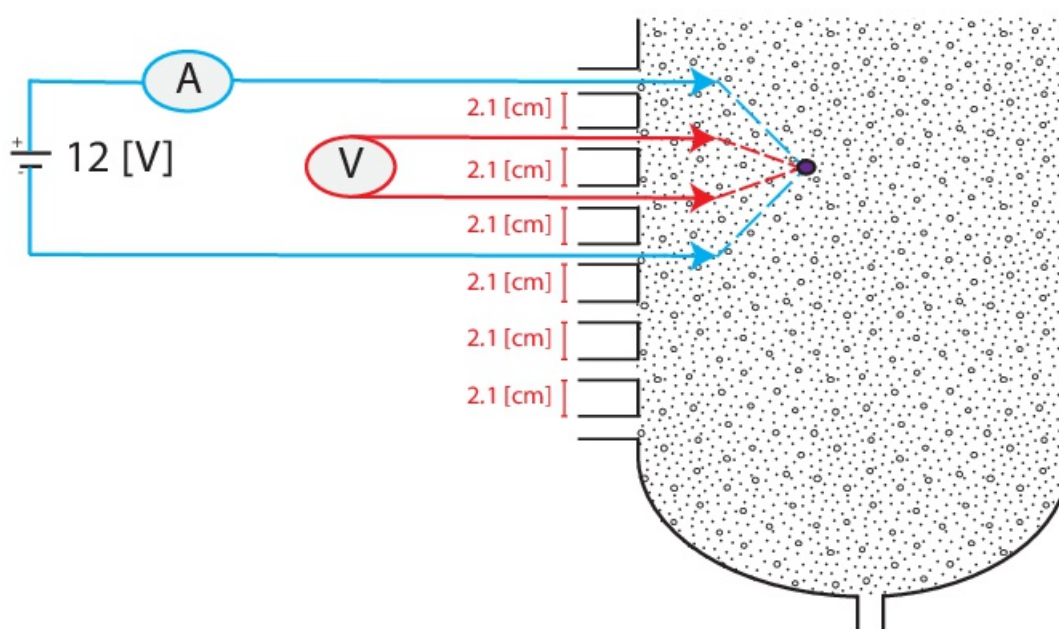


Figura 3.8: Esquema de conexión SEV en material granular. Arreglo Wenner. Línea continua roja: Cableado y electrodos de medida de Voltaje. Línea roja segmentada: Proyección al punto de medición de voltaje. Línea continua celeste: Cableado y electrodos de inyección de corriente. Línea segmentada celeste: Proyección del potencial generado por la corriente. Punto Negro relleno: Punto estimado de medición de SEV.

3.3.3. Procedimiento de laboratorio para estimar Porcentaje de Saturación.

En la presente sección, se detallará el procedimiento que se llevó a cabo en el laboratorio con las muestras correspondientes. Como se dijo con anterioridad, el experimento, se encuentra en condiciones controladas, tanto el material sólido como el fluido a estudiar.

Previo al comienzo de los experimentos, el material proveniente de la minera es secado con el objetivo de eliminar todo residuo de fluido que contenga dicho material, y tratar a cada muestra por igual. Las muestras son secadas a $100^{\circ}C$ en un horno especial de secado de muestras sólidas (Figura 3.9). Para asegurar que las muestras estén secas, se debe esperar entre 18 a 24 horas con las muestras en el horno, hasta alcanzar una masa constante (Asegurar que no exista fluido interno) (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1999). Para evitar posibles problemas de relación entre temperatura y masa que pueda sufrir la muestra a la hora de las

mediciones, se espera unos 10 minutos aproximadamente a que se enfríe el material luego de su extracción del horno.



Figura 3.9: Horno de secado para muestras, seteado a $100^{\circ}C$

El vaso experimental (ver Figura 3.5) es llenado con el material a estudiar (suelo de Beauchef o material proveniente de la minera). Al tener el sólido en este vaso especial, se vierte el fluido en la muestra, se espera que el líquido fluya por la mayor parte de la muestra por efectos gravitatorios, se abre la llave pasadora de fluido (Figura 3.5.C) que elimina restos de aguas que no fueron absorbidas por la muestra. El tiempo de espera a que el líquido fluya es variable, con tiempos entre 5 a 25 minutos con el objetivo de tener varias condiciones de humedades.

Luego de humedecer el material, se aplica corriente a la muestra en el recipiente por medio de los electrodos de corriente (Figura 3.5) con una batería de 12 [V], donde se mide la intensidad de corriente que fluye por la muestra en un punto y el voltaje en este mismo punto con los electrodos de voltaje, con un amperímetro y voltímetro respectivamente (se miden en el mismo instante, Figura 3.7). Este método de eléctrico es denominado SEV, como se vio con anterioridad.

Después de obtener los valores de voltaje e intensidad de corriente, se determina la masa a la muestra humectada en la pesa (Figuras 3.6.a). Esta masa humectada es llevada al horno para ser secada por un tiempo aproximado de 24 [hrs]; Al concluir las 24 [hrs], se vuelve a

pesar el material, obteniendo el valor de la masa seca del material.

Finalmente, se tiene los valores de la masa del material secado y la masa del material humectado, con lo cual se procede al cálculo del grado de humectación (Diferente al grado de saturación, expuesto en el capítulo 2) dado por la siguiente ecuación:

$$W_w = \frac{W_h - W_s}{W_s} \quad (3.11)$$

donde W_h es la masa del suelo humectado y W_s es la masa del suelo seco (Olguin Coca, 2011). Estos valores serán tabulados, para posteriormente ser graficados.

Sin embargo, se ha calculado el grado de humectación de la muestra, pero aún falta poder obtener el grado de saturación de esta misma. Para conseguir este valor, se hizo una estimación del grado de saturación teniendo como variable de entrada la humectación (W_w) de la muestra, basado en una aproximación simple de suelos saturados hecha por Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1999 y dada por la ecuación 3.12.

$$\begin{aligned} S_w &= \frac{W_w S_s}{e} \\ &= \frac{W_w S_s (1 - \phi)}{\phi} \end{aligned} \quad (3.12)$$

donde S_s representa el peso específico relativo de la masa del suelo, que fue calculada por la ecuación (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1999):

$$S_s = \frac{W_s}{W_s + W_h} \quad (3.13)$$

Por otro lado, la tasa de vacío de la muestra (e) en la ecuación 3.12, se aproximó en función de la porosidad, dada por la ecuación 2.13. Se debe hacer énfasis en esta última idea, el porcentaje de saturación depende de la porosidad (ϕ). Gracias a esta dependencia, se pudo obtener una porosidad que ajustará el modelo de Archie, mediante una inversión de mínimos cuadrados (explicado en la siguiente sección).

3.3.4. Procedimiento de laboratorio para medir Resistividad del Material poroso

El inversor de corriente (Figura 3.10) es un dispositivo que controla la polaridad de corriente. Es decir, tiene la opción de cambiar el sentido de la corriente entregada. Fue utilizado para poder controlar el ciclo negativo y positivo de la corriente añadida al SEV, con el objetivo de eliminar el voltaje espontaneo.

En particular, el inversor utilizado en las experimentaciones, tiene un switch, que indica la dirección del flujo de corriente, positivo o negativo. Es decir, para un flujo “positivo”, la lectura es de V^+ y I^+ conocido como **Ciclo Directo**. Por el contrario, para un flujo “negativo”, la lectura de datos es de V^- y I^- conocido como **Ciclo Inverso**.

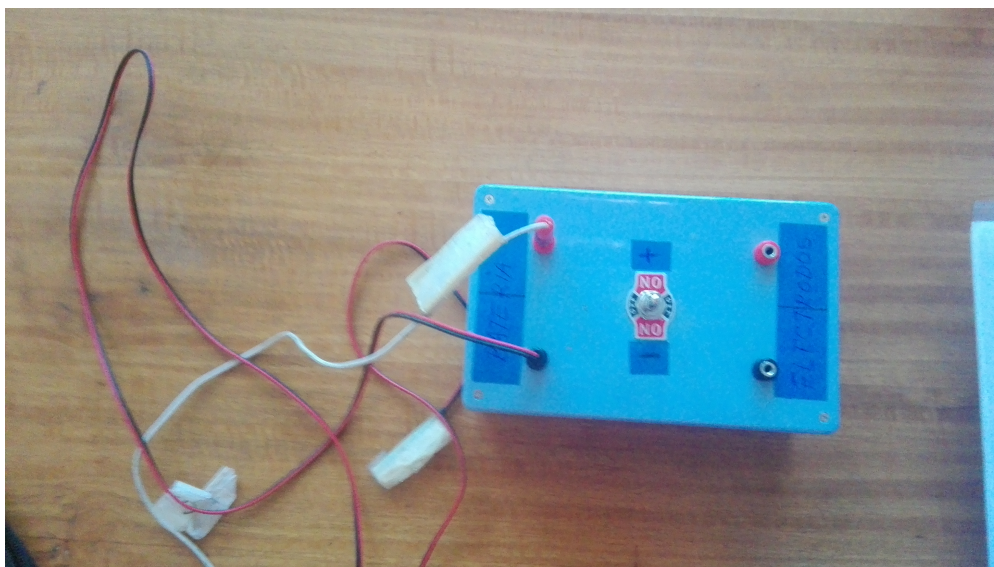


Figura 3.10: Inversor de corriente

Con una conexión en serie entre las baterías de corriente, pasando por los multímetros y llegando a los electrodos, se observa una lectura tanto en el amperímetro como en el voltímetro, los cuales posteriormente son tabulados para encontrar una resistividad aparente.

Sin embargo, los datos utilizados, y tabulados en las diferentes tablas del presente trabajo son el voltaje e intensidad medida, con estos resultados y el factor geométrico se estima la resistividad de corriente en un punto interno al material humectado.

En resumen, se cambio la polaridad de corriente inyectada en SEV para estimar los promedios de voltaje e intensidad por separados, por medio de la siguiente ecuación:

$$V = \left| \frac{V^+ - V^-}{2} \right| \quad (3.14)$$

$$I = \frac{|I^+ + I^-|}{2} \quad (3.15)$$

Por cada valor estimado de resistividad, el proceso de humectación y secado de la muestra debía comenzar de nuevo. Cada experimento, representa un valor de resistividad y saturación, y a su vez, para cada resistividad se obtuvo múltiples valores de intensidad de corriente [mA] y voltaje [V].

3.3.5. Procedimiento de laboratorio para estimar Resistividad del Fluido

La resistividad del fluido, es un parámetro que se necesitaba medir para obtener el porcentaje de saturación por medio del modelo de Archie. Con respecto a lo último, se utilizaron dos formas para estimar este valor. La primera, fue a través de un conductímetro, diseñado especialmente para medir la conductividad de líquidos, y la segunda, por medio del método SEV.

Conductímetro: El conductímetro es un instrumento digital que entrega los valores de conductividad y temperatura de algún fluido (líquidos). El conductímetro empleado para este trabajo es el WTW 2X00-001A (ver Figura 3.11)



Figura 3.11: Conductímetro WTW 2X00-001A. *Ovalo negro:* Medidor de conductividad, la separación entre las placas paralelas mide 1 [cm]

La Tabla 3.2, se tabularon los valores obtenidos por el conductímetro para agua potable, junto con los valores obtenidos para un experimento de prueba que se mostrará en la siguiente sección.

Medición de Conductividad/Resistividad del Fluido por medio del método SEV

Se montó la estructura del experimento (Figura 3.13), para medir la resistividad del agua potable, y poder comparar los resultados con los entregados por el conductímetro. El arreglo que se optó para medir la resistividad del fluido fue, *Wenner*, con un factor geométrico de $k = 2\pi \cdot 0.021$ [m]. Este es el arreglo y el factor geométrico que se montó para los todos los experimentos.

Figura 3.12: Resultados de resistividad eléctrica para un fluido, medidos con SEV



Figura 3.13: Experimentación únicamente con fluido utilizado en la primera experimentación (agua potable)

Tabla 3.1: Tabla de resultados de resistividad eléctrica para un fluido medido con el método SEV

Voltaje ⁺ [mV]	Intensidad ⁺ [mA]	Voltaje ⁻ [mV]	Intensidad ⁻ [mA]	Resistividad Calculada [$\Omega \cdot m$]
8380	130	-8350	-129.9	8.8
7880	132	-7860	-130.6	8.2
7850	131.4	-7800	-129.1	8.2
7750	126.5	-7710	-124.2	8.4

La Tabla 3.2, muestra los valores de resistividad entregado por el conductímetro con un valor de $10.7 [\Omega \cdot m]$ de promedio. En cambio, los resultados obtenidos con el montaje experimental, presenta un promedio de $8.4 [\Omega \cdot m]$.

Discutiendo este último resultado, el valor encontrado de resistividad eléctrica dado por SEV para este fluido, se encuentra en el orden con respecto al promedio de resultados entregado por el conductímetro, pero difieren en aproximadamente en $2 [\Omega \cdot m]$. Esta diferencia encontrada, se asoció a los clavos (electrodos) insertos en el vaso, dado que estos estaban lixiviados por las experimentaciones con el material granular y un fluido lixivante. Si se observa con atención la Figura 3.13 se puede ver que el agua no es transparente, si no que presenta un color amarillento. Una de las observaciones de laboratorio, fue precisamente que los clavos, emitían ácido remanentes de las experimentaciones con el material y el fluido lixivante (próximo capítulo), con lo cual se interpreta como una disminución de la resistividad debido a la combinación del agua y partículas conductoras entregadas por los clavos lixiviados al líquido.

Cabe destacar, que el factor geométrico utilizado y a utilizar, considera la hipótesis de

un semiespacio y no un recipiente finito. No obstante, se espera que los resultados no esten afectados por dicha hipótesis.

Con el presente experimento, se pudo concluir que el valor de resistividad entregado por el conductivímetro, es similar al obtenido con el montaje experimental, asegurando un resultado confiable para ambos métodos de adquisición.

3.3.6. Propagación de Errores en medición

Al obtener datos de laboratorio, se sabe que cada dato es independiente del otro obtenido, sin importar el arreglo de SEV o la consideración de errores instrumentales. Por otro lado, la incerteza en la obtención del conjunto de datos, es altamente estudiado en los análisis estocásticos de datos. Siguiendo con esta última idea, es interesante saber qué tan dispersos son los datos obtenidos en laboratorio.

Recordando que en laboratorio se adquirirán datos, tanto de saturación como de resistividad por medio de un voltaje y una intensidad de corriente (próximo capítulo), también se adquirirán los errores para la resistividad por medio de un cálculo de aproximación para una función multivariable. Cálculo basado en la propagación de errores siguiendo el procedimiento matemáticos de Hughes y Hase, 2010, basado en una expansión de Taylor.

Por otra parte, la adquisición de errores para la saturación, será calculada solo por un método de conservación de masa entre el fluido y el material seco, considerando la masa conjunta entre ambos. Es decir, la masa del fluido junto con el material granular seco, no debe ser diferente que el $\pm 10\%$ de la masa del material húmedo (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1999).

Para considerar el error del Factor de Formación, se recuerda que este parámetro es la razón entre la resistividad medida (ρ_{eff}) y la resistividad del fluido (ρ_w). Ambas variables son medidas en laboratorio, por ende, cada una tiene un error asociado. Sin embargo, ρ_{eff} , es la razón entre el voltaje medido y la intensidad de corriente multiplicado por un factor geométrico dependiente de la distribución del arreglo (Ecuación 2.9); donde las variables mencionadas medidas presentan un error asociado.

Al considerar una función multivariable $Z = f(A, B, C, \dots)$, como es el caso tanto de la resistividad aparente ($\rho_{eff}(V, I) = \frac{V}{I}$) como el Factor de Formación ($F(\rho_{eff}, \rho_w) = \frac{\rho_{eff}}{\rho_w}$), el error asociado a estas funciones, viene dada por la ecuación 3.16 (Hughes y Hase, 2010).

$$\sigma_Z^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial B}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial C}\right)^2 \sigma_C^2 + \dots \quad (3.16)$$

donde σ_A representa la desviación estándar para el set de datos de la variable A . En otras palabras, para cada muestra del material, se obtiene un set de datos de resistividades eléctricas, al cual se calcula su desviación estándar.

3.3.7. Metodología de Inversión de datos en laboratorio

Al igual que la inversión para ERT, la metodología de inversión de datos en laboratorio, comienza con la ecuación 3.1, donde M son los parámetros que se quiere ajustar, d representa los datos a los que se quiere ajustar el modelo y G matriz de Green. En este caso, el vector M que se quiere encontrar, está representado por los factores de saturación (n) y de cementación (m), parámetros que se quieren encontrar para calibrar la ecuación de Archie. En laboratorio

(explicado en el próximo capítulo) se midió la resistividad de una muestra granular en varias condiciones de humectación. Estos datos, serán representados por el vector de datos d . Otro de los datos medidos en laboratorio, fue la saturación, que para esta ecuación matricial compondrá la matriz de Green junto con el logaritmo de la porosidad, donde este último es otro de los parámetros que se quiere encontrar. Esta ecuación matricial, está representada por la ecuación . Para finalizar de desacoplar la ecuación de Archie, el valor de la tortuosidad (τ) será dejará constante con un valor de $\sqrt{3}$. Esto es basado en el estudio de Shen y Chen, 2007, que representa a escalas de tiempo la difusión de un fluido a través de un medio poroso con una granulometría constante. Al graficar el logaritmo en base 10 de estos datos, se espera que se recupere una tendencia lineal inversa entre ellos, donde la pendiente de esta recta, representa el opuesto al factor de saturación $-n$ (Lyle y Mills, 1989).

A partir de la ecuación , se forma una ecuación logaritmica, obteniendo la función 3.17.

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{\rho_{eff}}{\rho_w} \cdot \frac{1}{\tau}\right) &= -n\log(S_w) - m\log(\phi) \\ \log\left(\frac{F}{\tau}\right) &= -n\log(S_w) - m\log(\phi) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Al saber que la ecuación anterior tiene una relación lineal, el modelo M se ajustará por medio de mínimos cuadrados (norma- l_2) al igual que la inversión para ERT. Formando la relación $GM = d$ de forma matricial, donde el modelo M posee los parámetros que se quieren encontrar y el sub-índice k representa el numero de datos obtenidos en laboratorio.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \log(F_1/\tau) \\ \log(F_2/\tau) \\ \vdots \\ \log(F_k/\tau) \end{pmatrix}}_d = \underbrace{\begin{pmatrix} \log(S_{w1}) & \log(\phi) \\ \log(S_{w2}) & \log(\phi) \\ \vdots & \vdots \\ \log(S_{wk}) & \log(\phi) \end{pmatrix}}_G \underbrace{\begin{pmatrix} -n \\ -m \end{pmatrix}}_M \quad (3.18)$$

Se crea el vector residual entre las observaciones y el modelo de predicciones correspondientes.

$$r = GM - d$$

Esta solución es de especial interés debido a que es fácilmente susceptible a intuición y análisis geométrico y porque resulta estadísticamente la solución más probable si los errores de datos son normalmente distribuidos (Aster et al., 2011).

La solución de mínimos cuadrados para los parámetros del modelo ajustado, por una solución de norma l_2 , esta dada por:

$$M_{l_2} = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (3.19)$$

Agregando la desviación estándar (ε) dentro de la solución, se escala el sistema de ecuaciones, obteniendo un sistema matricial con peso, dando así mayor importancia a los datos que tengan un menor error. La matriz de peso viene dada por la ecuación $W_d = \text{diag} \{1/\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_M\}$. Dicha matriz, es incluida, tanto a la matriz de Green como al set de datos:

El nuevo sistema de ecuaciones con peso es:

$$G_W m = d_W \quad (3.20)$$

Reemplazando términos en la ecuación 3.19, se obtiene:

$$M_{l2} = (G_W^T G_W)^{-1} G_W^T d_W \quad (3.21)$$

Sin embargo, este modelo tiene asociado un error. El cual puede ser calculado por la matriz de covarianza del modelo (C_M) a partir de la matriz de covarianza de los datos (C_d):

$$C_M = (G_W^T G_W)^{-1} G_W^T C_d G_W (G_W^T G_W)^{-1} \quad (3.22)$$

Esta matriz es cuadrada, donde su diagonal representa la varianza para cada uno de los parámetros y será esencial a la hora de estudiar los errores de los ajustes en los próximos capítulos.

3.3.8. Inversión de datos para aproximación por mínimos cuadrados y descripción de Script a emplear

Para poder invertir los datos del laboratorio, se crean Scripts en Matlab que cumplan con los requerimientos de inversiones dadas por el autor. En la presente sección se describirán las funciones primarias de dichos Script y el algoritmo de búsqueda para la mejor solución.

- **Formar G:** Función que crea la matriz Green a partir de una porosidad constante para cada elemento, y la saturación calculada. Esta matriz posee dimensiones de $2xK$, donde K representa la cantidad de datos medidos en laboratorio.
- **MincuadSimple:** Función para calcular los parámetros del modelo y matriz de covarianza del mismo, usando ecuación 3.19.
- **Mincuad:** Función de cálculo de parámetros del modelo y matriz de covarianza del modelo, añadiendo peso a los datos por medio de la matriz de covarianza de los datos.
- **BusquedaPhi:** Busca iterativamente la porosidad que mejor ajuste los datos basados en ciertas condiciones. En la Figura 3.14, se observa el algoritmo de búsqueda para la porosidad.

Con estas funciones, se procede a invertir los datos de laboratorio para los distintos suelos estudiados. En primera instancia se grafican los datos en logaritmo de saturación (S_w) versus factor de formación ($F = \frac{\rho_{eff}}{\tau \rho_w}$) con su error asociado, donde este error, es la desviación estándar del vector de datos tomados en laboratorio para un mismo experimento.

Al crear la matriz de Green, surge una incertidumbre. ¿Cuál debe ser la porosidad que se debe aplicar para cada inversión? Esto se debe a que, al construir la matriz de Green, se necesita una porosidad ϕ que no es conocida, y que se considerará constante en todo el espacio interno a una pila de lixiviación.

Para responder esta interrogante, se utilizó el Script **BusquedaPhi**. Básicamente este Script crea un vector de porosidades sintéticas con valores entre 0,01 y 0,99, creando para cada valor de ϕ_i una matriz de Green. Para cada una de estas matrices de Green, se procede a calcular los parámetros de Archie por medio de una inversión de mínimos cuadrados, ajustando los valores entre la resistividad medida en laboratorio y una saturación *sintética* (dependiente de la porosidad, ecuación 3.12). Esta gamma de parámetros de Archie calculados, fueron filtrados dada ciertas condiciones entregadas por la literatura:

$n > m$: Como se vio con anterioridad, múltiples autores han concluido que el factor de saturación de un medio poroso (n) es mayor al factor de cementación m .

$m > 1$: Según la literatura, el valor de cementación debería ser mayor a 1.

El menor error: Por último, dada las condiciones anteriores, se obtiene una matriz de covarianza (Dimensiones 2×2) por cada inversión hecha con las diferentes matrices de Green (Cada matriz de Green, representada por un valor de porosidad), escogiendo así, la porosidad que presente el menor error. Matemáticamente, esto sería encontrar la matriz de covarianza del modelo que presente la menor traza.

Con estas condiciones en el algoritmo (Esquema del algoritmo utilizado 3.14), se encuentra una porosidad ϕ_{final} que ajusta de mejor manera el modelo a los datos. Por otra parte se comparan los resultados obtenidos, con los de otros autores, presentados en las Tablas 2.3, 2.2 y 2.1, las cuales presentan valores para distintos n , m y ϕ , confirmando que los datos calculados están dentro de las categorías estudiadas por otros, validando así los resultados encontrados por el autor del presente trabajo.

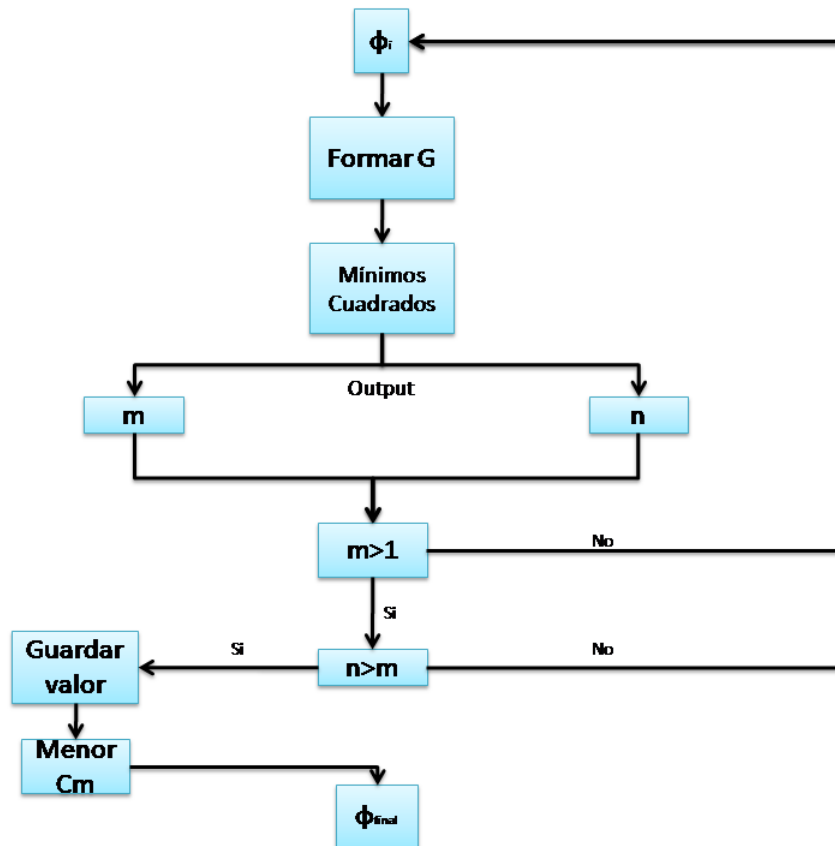


Figura 3.14: Algoritmo de búsqueda de porosidad del medio ϕ_{final} . El sub-índice i representa el i -ésimo ϕ , del vector que tiene un largo P . C_m : Matriz de covarianza del modelo

3.4. Experimento de prueba, utilizando material no consolidado de Campus Beacheff

Con el objetivo de poder acreditar de alguna manera los resultados de este trabajo, se realizó un experimento de prueba utilizando material del suelo proveniente campus Beacheff (Figura 3.15) y agua potable como fluido humectante.

La Tabla 3.2, se muestra seis experimentos junto con los resultados de cada uno de ellos. Para cada experimento, se variaron los parámetros iniciales tales como el volumen de fluido inicial y la masa del material.

Tabla 3.2: Tabla de resultados experimentación con material granular no consolidado. Resistividad del fluido medido con conductivímetro y del material medida con SEV

N°	Cantidad de Fluido inicial [mL]	Masa Humectada [g]	Masa Seca [g]	Resistividad del Fluido (ρ_w) [$\Omega \cdot m$]	Resistividad efectiva del material (ρ_{eff}) [$\Omega \cdot m$]	Saturación [%]
1	300	1227.34	933.47	10.63	9.42	48.21
2	200	705.31	527.22	10.75	8.13	51.22
3	250	909.78	698.1	10.61	9.95	46.67
4	200	680.41	504.65	10.98	7.85	52.58
5	300	986.38	683.32	10.63	5.24	64.35
6	250	943.48	683.65	10.86	6.51	56.61

La suma entre la masa del sólido y la masa del fluido para cada experimento, debiesen ser similares a la masa del material humectado, o al menos tener un error no mayor al $\pm 10\%$, calculado por la ecuación 3.23.

$$error_{masa} = \frac{M_S + M_f}{M_H} \cdot 100 \quad (3.23)$$

Donde M_S representa la masa del material seco, M_f es la masa del fluido y M_H es la masa del material humectado.

Tabla 3.3: Valores obtenidos para error de conservación de masas entre masa seca y masa del fluido. Signo negativo (-) indica una falta de masa húmeda. Signo positivo (+) indica un exceso de masa

N°	Error [$\pm\%$]
1	-0.5
2	-3.12
3	-4.21
4	-3.56
5	+0.31
6	+1.04

En algunos casos, existió una falta de masa entre la suma de agua y material seco, para alcanzar el valor de la masa húmeda, el cual se tabuló con un signo negativo. Para un exceso de masa, se cumple el caso contrario, el cual fue atribuido a error y sensibilidad de la pesa.

Sin embargo, al considerar esta falta o exceso de masa, los porcentajes de error deben ser menor al $\pm 10\%$. Todos los valores de error en la Tabla 3.3, dan menores a este último.

Para una falta de masa, se adjudicó a pérdida de material a la hora del pesaje. Por el contrario, en un exceso de masa, se adjudicó a problemas en la sensibilidad de la pesa, la inclusión del vaso precipitado en el pesaje del material, y material remanente de alguna experimentación anterior.

Con estos resultados preliminares de laboratorio, se obtiene la gráfica 3.15. En el eje vertical, se presenta el logaritmo del factor de formación ($F = \frac{\rho_{eff}}{\rho_w}$) y en el eje horizontal el logaritmo de la saturación.

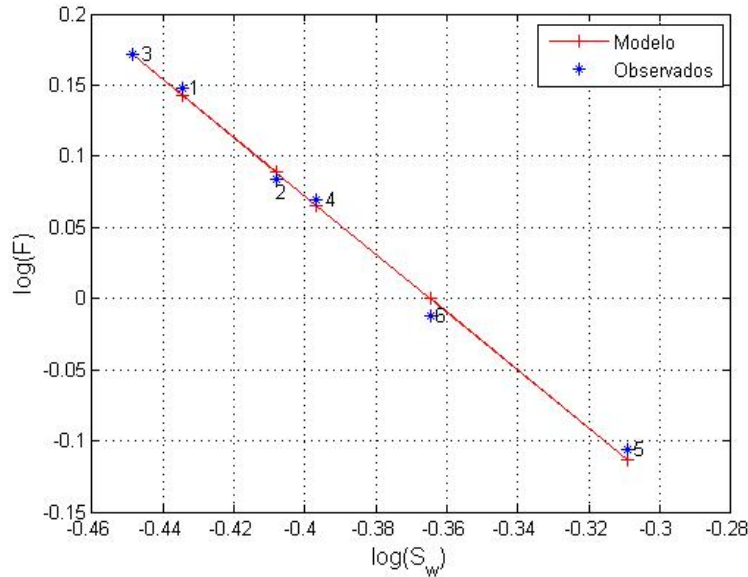


Figura 3.15: Gráfico experimento con material no consolidado Campus Beauchef

Para esta gráfica, se estimó que la porosidad a la que responde de mejor manera el modelo, es de 0.28. Mientras tanto, los factores de cementación (m) y saturación (n) son de 1.42 \pm 0.48 y 2.0388 \pm 0.91 respectivamente (Tabla 3.4).

Tabla 3.4: Valores obtenidos para material no consolidado. ϕ , m y n

Porosidad ϕ	$n \pm \Delta n$	$m \pm \Delta m$
0.28	2.0388 \pm 0.91	1.42 \pm 0.48

Analizando los errores de la Tabla 3.4 (Δm y Δn), se puede observar que son números altos con respecto a los valores encontrados para los exponentes de Archie. El material estudiado, se considera como un tipo de suelo arcilloso, específicamente, tierra limpia. Al ver Tablas 2.2 y 2.3, se deduce que los resultados están dentro de lo esperado.

La experimentación con este material, entregó datos preliminares para concluir que la metodología y resultados, están dentro de lo esperado, dando paso a la experimentación con el material principal de la pila de lixiviación y un fluido lixivante.



Figura 3.16: Material granular no consolidado de campus Beaufef

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Introducción

En el capítulo 2, se expusieron dos modelos empíricos desarrollado por diferentes autores para determinar el porcentaje de saturación en una muestra porosa. El modelo de Archie y de Waxman-Smits. No obstante, en el presente trabajo, los resultados serán modelados sólo con el modelo empírico de Archie. Esto debido a que el modelo de Waxman-Smits, considera el efecto provocado por el intercambio iónico entre la matriz del grano y el fluido, sin embargo, no se encontró una forma óptima de poder estimar el valor numérico de este parámetro.

En la campaña de adquisición de datos de resistividad eléctrica para pilas de lixiviación, existieron cinco líneas de medición configuradas a lo ancho de la pila (Capítulo anterior). No obstante, los resultados de este trabajo, se encuentran enfocados en el perfil central y se expondrán dos secciones de resistividad. La primera sección fue adquirida 15 horas luego de comenzado el riego, mientras que la segunda sección transcurrieron más de 24 horas después de comenzado el riego. De la misma forma, se presentaran los resultados en la etapa de laboratorio, la cual fue primordial para poder calibrar los parámetros del modelo de Archie y poder estimar el porcentaje de saturación a partir de resistividades eléctricas, aplicado a una pila de lixiviación real.

A partir de los resultados en laboratorio, se encontró un comportamiento interesante que se da en la interacción del fluido con el material poroso. En particular, una diferencia entre la resistividad del fluido inicial, el cual es previo a la filtración entre los poros del material y la resistividad final, que fue medida posterior a la filtración entre los poros del material. La Conductividad (resistividad) del fluido, fue medida con el conductivímetro en todos los experimentos.

4.2. Resultados de Laboratorio Petrofísico

En la presente sección, se muestra los resultados de los experimentos en laboratorio. Dentro de estos, se obtuvieron los valores de los parámetros de Archie (m , n y ϕ) para el material proveniente de la pila de lixiviación. Por otra parte, como consecuencia de los experimentos en laboratorio, se encontró que la resistividad de los fluido experimentales (Agua y fluido lixivante), varían una vez filtrado a través de alguno de los sólidos estudiados (agua y material del campus Beauchef). Por último, se calculó la porosidad (ϕ) del material proveniente de la pila de una manera análoga, solo tomando en cuenta: el volumen del material, volumen

del fluido antes y después de ser filtrado a través del material granular, y la densidad del material sólido.

Cabe destacar, que el valor de la resistividad medida, es un valor calculado a partir de un voltaje e intensidad de corriente por la ecuación 2.9, donde ambos presentan un error de medición, por ende, el error presentado por la resistividad será calculado como una propagación de error en una función multivariada (Expuesto en el capítulo anterior). Además, todos los valores de resistividad de los fluidos, fueron adquiridos mediante el conductivímetro, recordando que en el capítulo anterior, se mostró que tanto el conductivímetro como el método SEV, presentan resultados similares.

4.2.1. Material proveniente de pila de lixiviación

Dado que los resultados parcialmente satisfactorios presentados en el capítulo anterior con el material no consolidado del campus Beauchef, se da inicio al experimento principal con el material proveniente del aglomerador.

A diferencia de la experimentación anterior (Capítulo 3, material campus Beauchef y agua como fluido), por cada resistividad observada con el método SEV, se registraron varios datos de voltaje e intensidad. Dado esto último, se puede entregar un registro de propagación de errores por cada cálculo realizado. En otras palabras, se obtuvo por cada experimento un voltaje e intensidad promedio (\bar{V} Y \bar{I}) junto con sus respectivos errores (∂V y ∂I). En conclusión, el cálculo del error asociado a la resistividad ($\partial \rho$) está dado por la ecuación 3.16.

Por otra parte, se realizaron experimentos en dos zonas diferente del vaso experimental por cada muestra analizada. La primera zona se encuentra a 7,5[cm] de la base superior del vaso experimental, y será denominada como *zona superior*. En cambio, la segunda zona de estudio se encuentra a 11,5[cm] de la base superior del vaso, denominada como *zona inferior*. Las diferencia de altura entre ambas zonas de estudio, es de 4[cm] aproximadamente (Figura 4.1). Esta diferencia de altura, intenta replicar lo que ocurre en una pila de lixiviación real, y así poder observar y discutir si existen cambios de resistividad, saturación y porosidad en profundidad.

El cálculo de la porosidad, fue efectuado gracias al algoritmo de búsqueda inventado por el autor de la presente tesis, expuesta en el capítulo 3.3.8. Recordando el desarrollo este proceso, fue básicamente entregar una porosidad como semilla al *SCRIPT*, y a partir de esto se obtenía un valor de saturación (Dado que esta en función de la porosidad), un valor para m y n por cada experimento. Posterior al calculo de dichos parámetros, estos últimos son filtrados dada ciertas condiciones basadas en estudios anteriores (Capítulo3). Por último, se escoge el valor de porosidad que mejor ajuste el modelo lineal entre los logaritmos del factor de formación (F) y la saturación sintética. Este último valor estimado, además de estar en función de la porosidad del material, tiene como parámetros de entrada la masa seca y húmeda del material.



Figura 4.1: Gráfica de niveles superior e inferior. Línea verde continua, indica la profundidad aproximada de los puntos observados de resistividad eléctrica medida con SEV para el nivel superior. Línea naranja discontinua, indica la profundidad aproximada de los puntos observados de resistividad eléctrica medida con SEV para el nivel inferior. Las profundidades son valores medidos desde la base superior del vaso

Tabla 4.1: Resultados Experimentación con material granular proveniente del aglomerador. Experimento zona superior. Conductividad del fluido medido con Conductivímetro.

Nº	Cantidad de Fluido inicial [mL]	Masa Humectada [g]	Masa Seca [g]	Resistividad del Fluido [$\Omega \cdot m$]	Resistividad medida [$\Omega \cdot m$]	Saturación [%]
1	250	1041.2	952.92	1.367	5.8148	15.25
2	200	1090.4	1014.1	1.367	12.594	12.41
3	300	1126.4	1035.9	1.379	5.631	14.42
4	100	958.29	879.5	1.366	5.485	14.73
5	200	959.83	894.71	1.388	14.402	12.12
6	200	1219.6	1133.3	1.379	6.335	12.6
7	225	992.45	908.03	1.391	5.406	15.3
8	250	1028.25	942.92	1.375	10.931	14.9
9	250	1090.47	1014.1	1.373	6.549	17.63
10	200	1137.43	929.07	1.370	1.553	34.73
11	250	1073.46	925.18	1.369	3.722	25.52
12	200	1084.36	1011.4	1.369	16.03	11.9
13	200	898.71	830.38	1.366	11.752	13.64
14	225	999.1	835.51	1.367	6.052	18.15
15	200	1031.85	862.8	1.367	2.647	30.74

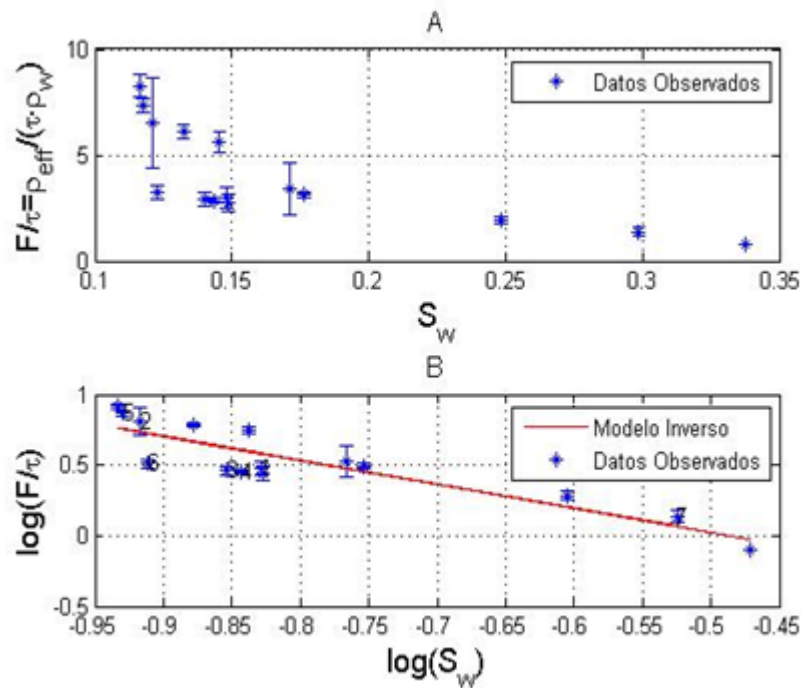


Figura 4.2: Gráfica resultados material proveniente del aglomerador, experimentación zona superior. A: Datos observados en laboratorio, eje horizontal representa la saturación calculada a partir de la porosidad óptima encontrada, eje vertical representa la razón entre el factor de formación y tortuosidad. B: Gráfica log-log de Figura A

La Figura 4.2, muestra las graficas obtenidas en laboratorio para el experimento hecho en

la zona superior del vaso, tomando en cuenta que la saturación es estimada con respecto a la porosidad encontrada. En esta Figura, muestra las observaciones en laboratorio y la Tabla 4.2 se tabularon los parámetros de Archie.

Tabla 4.2: Valores petrofísicos obtenidos para material proveniente del aglomerador. ϕ , m y n , zona superior

Porosidad ϕ	$n \pm \Delta n$	$m \pm \Delta m$
0.23	1.6 ± 0.5098	1.13 ± 0.62

Tabla 4.3: Resultados Experimentación con material granular Proveniente del aglomerador, experimento zona inferior

N°	Cantidad de Fluido inicial [mL]	Masa Humectada [g]	Masa Seca [g]	Resistividad del Fluido (ρ_w) [$\Omega \cdot m$]	Resistividad efectiva del material (ρ_{eff}) [$\Omega \cdot m$]	Saturación [%]
1	250	1041.2	952.92	1.367	6.566	17.718
2	200	1090.4	1014.1	1.367	13.843	14.475
3	300	1126.4	1035.9	1.379	7.198	16.736
4	100	958.29	879.5	1.366	6.516	17.1406
5	200	959.83	894.71	1.388	19.297	14.052
6	200	1219.6	1133.3	1.379	7.634	14.669
7	225	992.45	908.03	1.391	6.254	17.768
8	250	1028.25	942.92	1.375	5.659	17.376
9	250	1090.47	1014.1	1.373	5.188	20.462
10	200	1137.43	929.07	1.370	1.816	40.332
11	250	1073.46	925.18	1.369	1.977	29.676
12	200	1084.36	1011.4	1.369	14.313	13.921
13	200	898.71	830.38	1.366	9.887	15.807
14	225	999.1	835.51	1.367	3.196	21.072
15	200	1031.85	862.8	1.367	1.879	35.69

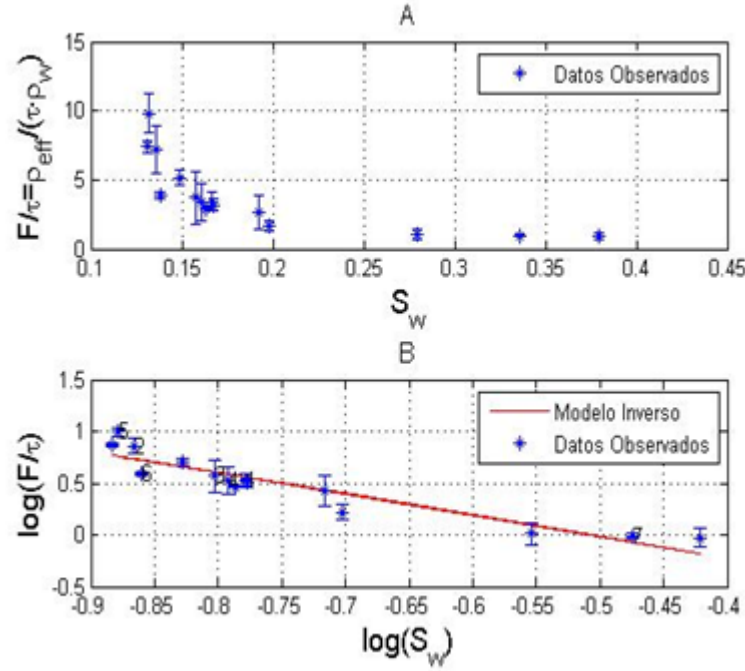


Figura 4.3: Gráfica resultados material proveniente del aglomerador, experimentación zona inferior. *A:* Datos observados en laboratorio, eje horizontal representa la saturación calculada a partir de la porosidad óptima encontrada, eje vertical representa la razón entre el factor de formación (F) y tortuosidad (τ). *B:* Gráfica log-log de Figura *A*

Tabla 4.4: Valores obtenidos para material proveniente del aglomerador. ϕ , m y n , zona inferior

Porosidad ϕ	$n \pm \Delta n$	$m \pm \Delta m$
0.21	2.04 ± 0.5843	1.31 ± 0.6

Comparando los resultados mostrados en las Tablas 4.2 y 4.4, se puede notar que los parámetros encontrados para las dos zonas estudiadas, presentan una diferencia entre el valor de sus porosidad. Este cambio de porosidad se puede asociar, al comportamiento isotrópico del medio. Si bien, es el mismo material analizado, pero con una granulometría irregular, es esperable que las partículas en profundidad (con respecto a la zona superior del vaso experimental) sufran un re ordenamiento entre los poros de los clastos más grandes, disminuyendo así los espacios por donde el fluido puede discurrir. Este re ordenamiento en profundidad, podría deberse al peso de la columna que se encuentra por sobre el nivel estudiado.

Por otra parte, al verse afectado los valores de porosidad en diferentes niveles, tiene como consecuencia un cambio de valor en la saturación para los diferentes experimentos. Debido a estos cambios, es que se ven conjuntamente afectado los parámetros de Archie (m y n).

Otro de los posibles efectos que podría haber afectado la diferencia de porosidad encontrada para distintos niveles estudiados, sería la acumulación del fluido en la zona inferior del vaso experimental. Este comportamiento fue observado tanto en laboratorio como en la misma pila de lixiviación real. Al concentrarse fluido en la zona inferior, este afecta al valor

de resistividad medida (o efectiva), y por ende, al ajuste de las observaciones variando las saturaciones estimadas.

Las Tablas 4.1 y 4.3, muestran los distintos experimentos (N) con sus respectivos datos de referencia, todos medidos en laboratorio. Dichas Tablas, presenta para cada fila (cada experimento representa una fila) los mismos valores de forma respectiva, exceptuando la resistividad medida y la saturación, esto debido a que por cada experimento, se midió en zona superior e inferior.

Comparando los exponentes de Archie entre el nivel superior e inferior, se puede decir por una parte que el factor de cementación (m) es similar para ambos niveles, un resultado interesante dado que este factor está directamente relacionado con el valor de la porosidad del material. Como se dijo con anterioridad, se ha encontrado una leve compactación del material, lo cual indica una disminución de la porosidad. No obstante, al tratarse del mismo material, al disminuir la porosidad, el factor de cementación debe incrementar para lograr el mismo porcentaje de saturación. En fin, los valores de porosidades para ambos niveles, son similares, al igual que su factor de cementación.

Al comparar los valores del factor de saturación (n) entre niveles, se puede observar que son significativamente diferentes. En el nivel superior, se alcanzó un valor de 1.6, mientras que en el nivel inferior es de 2.04. Esto se puede discutir al comparar las gráficas 4.2.A y 4.3.A, y observar que en la zona inferior, se alcanzó una saturación mayor que en la zona superior, llegando casi al 45 %. Esto es debido a la acumulación de fluido en la zona inferior (como se discutió con anterioridad) y por ende, al obtener una saturación mayor, es esperable que el exponente de saturación sea mayor.

Al mismo tiempo, no se puede decir nada de un cambio de porosidad con respecto a la profundidad del material. Solo se puede decir que existe un cambio observable en pequeños niveles de ésta. Sin embargo, las Tablas 4.2 y 4.4 muestran la desviación estándar para m y n , que por cierto, son valores altos dado el valor encontrado para cada parámetros. Este valor de error se asocia a la cantidad de datos observados que se intentó ajustar. Para disminuir este error, se debe obtener una cantidad de datos mucho más robustas que los presentes experimentos.

4.2.2. Conductividades del fluido antes y después de ser filtrados en sólido

Uno de los resultados anexos encontrados en el presente trabajo, es la diferencia de conductividad del fluido al pasar por el material granular. Recordando que se trabajó con dos materiales granulares (Suelo común y material proveniente de la mina Amalia, cobre) y dos fluidos diferentes (Agua potable y un fluido lixivante).

Los fluidos cambian sus conductividades, aumentando o disminuyendo dependiendo del material por el cual es permeado.

Se realizó dos casos que comprobarán estas hipótesis. Dichos experimentos se realizaron de forma independiente a los experimentos del capítulo anterior.

Comparando los resultados expuestos en las Tablas 4.5 y 4.6, podemos notar un interesante cambio en las conductividades que presentan los fluidos inicialmente. Por ejemplo la Tabla 4.5, se comparan ambos fluidos con el material granular, suelo natural; La conductividad tanto del agua como del fluido lixivante disminuyen al ser filtrados por el suelo natural (Suelo de Beauchef), a diferencia de los fluidos que son permeados por el material proveniente del aglomerador. Esto se puede notar en la Tabla 4.6, donde se observa que las conductividades

Tabla 4.5: Tabla de comparación entre conductividades eléctricas del fluido antes y después de ser permeados a través del material sólido. Suelo de Beauchef.

Suelo Natural			
Agua		Fluido Lixiviante	
Conductividad Inicial [S/m]	Conductividad Final [S/m]	Conductividad Inicial [S/m]	Conductividad Final [S/m]
0.1245	0.0488	0.730	0.1038
0.1268	0.0319	0.714	0.0811

de los fluidos aumentan al ser combinados con este material.

Tabla 4.6: Tabla de comparación entre conductividades eléctricas del fluido antes y después de ser permeados en el material sólido, material proveniente del aglomerador.

Material Proveniente del aglomerador			
Agua		Fluido Lixiviante	
Conductividad Inicial [S/m]	Conductividad Final [S/m]	Conductividad Inicial [S/m]	Conductividad Final [S/m]
0.1308	1.345	0.73	2.83
0.1111	1.4506	0.718	1.564

Estos resultados son asociados a las propiedades de los materiales granulares y al intercambio electro-químico entre fluido y el sólido. En otras palabras, la tierra natural, adquiere electrolitos del fluido, limpiando el fluido de partículas conductivas. Siguiendo el mismo proceso, el material del aglomerador, al contener cobre, realiza un intercambio electro-químico contrario al del suelo, entregando electrolitos al fluido.

4.2.3. Cálculo de la porosidad para el material de la pila por definición

En la sección anterior, se mostró un modelo inverso para el ajuste de los datos observados de saturación y factor de formación medidos en laboratorio, tomando en cuenta la masa humectada con fluido, la masa seca y la resistividad medida.

En laboratorio, se controló la cantidad de fluido entrante en la muestra del vaso experimental (Figura 3.5). Posteriormente, se registró la cantidad de fluido final que dejó permear las muestras.

En base a esto, se calculará la porosidad por definición (Ecuación 2.10), a partir de los valores obtenidos en laboratorio, tomando en cuenta ciertas hipótesis y alcances para estos resultados, dando así una corroboración de los resultados anteriores.

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} = \frac{V_p}{V_p + V_g}$$

En estricto rigor, debemos conocer los valores de V_p y V_g para poder conocer la porosidad. La forma de encontrarlo, es basarse en la hipótesis de Archie, **la porosidad del material es efectiva, o sea, todos los poros pueden albergar fluido**. Basándose en esta hipótesis, el volumen de poros V_p , se considera como el volumen absorbido por el material, es decir la

diferencia entre el volumen inicial agregado a la muestra y el volumen recuperado luego de permear en la muestra.

Por otro lado, el volumen del grano, V_g , se considera como el volumen del material sólido. Sin embargo, no se cuenta con este dato de manera in-situ. No obstante, este volumen, se calcula como la razón entre la masa del grano (m_g dato obtenido de laboratorio) y su densidad (ecuación 4.1, Dato obtenido de forma experimental y descrito en el apéndice A. D_g)

$$V_g = \frac{m_g}{D_g} \quad (4.1)$$

La densidad determinada para el material granular proveniente del aglomerador, es de 2.51 ± 0.07 . Por ende, la nueva ecuación para el calculo de porosidad es:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{V_p}{V_T} \\ &= \frac{V_p}{V_p + V_g} \\ &= \frac{V_p}{V_p + \frac{m_g}{D_g}} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Tabla 4.7: Tabla de valores de porosidad calculado por definición

Volumen inicial [mL]	Volumen Final[mL]	Volumen Absorbido [mL]	Masa Grano [g]	Porosidad Calculada
250	200	50	952.92	0.1196
200	125	75	1014.1	0.1608
300	215	85	1035.9	0.1753
100	30	70	879.5	0.1709
200	150	50	894.71	0.1264
200	120	80	1133.3	0.1546
225	150	75	908.03	0.1762
250	170	80	942.92	0.1802
250	200	50	1014.1	0.1132
200	0	200	929.07	0.358
250	150	100	925.18	0.2187
200	130	70	1011.4	0.152
200	130	70	830.38	0.1792
225	60	165	835.51	0.3384
200	50	150	862.8	0.3105

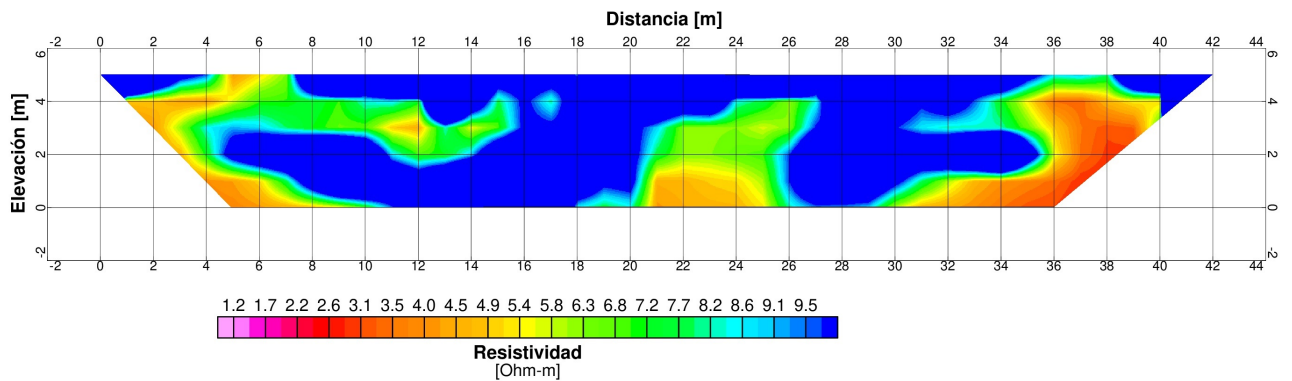
El valor promedio de las porosidades mostrados en la Tabla 4.7, nos da un valor de 0.21. Este valor fue calculado, solo considerando las masas y volúmenes de fluidos insertos en los distintos experimentos, en consecuencia, no se consideró la parte superior e inferior como zonas diferentes, sino mas bien como un todo.

El valor de la porosidad calculado para este material, es un valor similar al encontrado por el método de Mínimos cuadrados con peso visto en la sección anterior, lo cual valida por dos métodos diferentes, el valor de porosidad que se encuentra en este material.

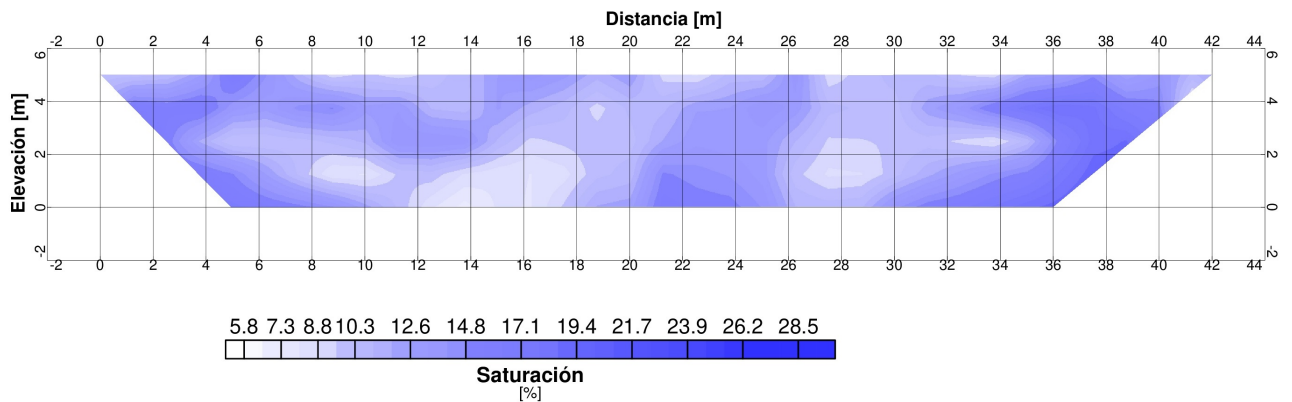
4.3. Resultado Final

Ya calibrado los parámetros del modelo de Archie, se da comienzo al procesamiento del objetivo final del presente estudio, entregar una sección de porcentaje de saturación a partir de datos de resistividad eléctrica.

A pesar que los valores de porosidad, y factores del modelo de Archie (ϕ , m y n) obtenidos en laboratorio sean diferentes para distintas profundidades, los valores con los cuales se calibró el modelo de Archie, fueron: una porosidad de $\phi = 0.22$, $m = 1.45$ y $n = 2$. Estos valores, son un promedio entre cada parámetro para las dos zonas estudiadas.



(a) Sección de resistividad en pila de lixiviación real. Minera Amalia. Perfil cental de medición.



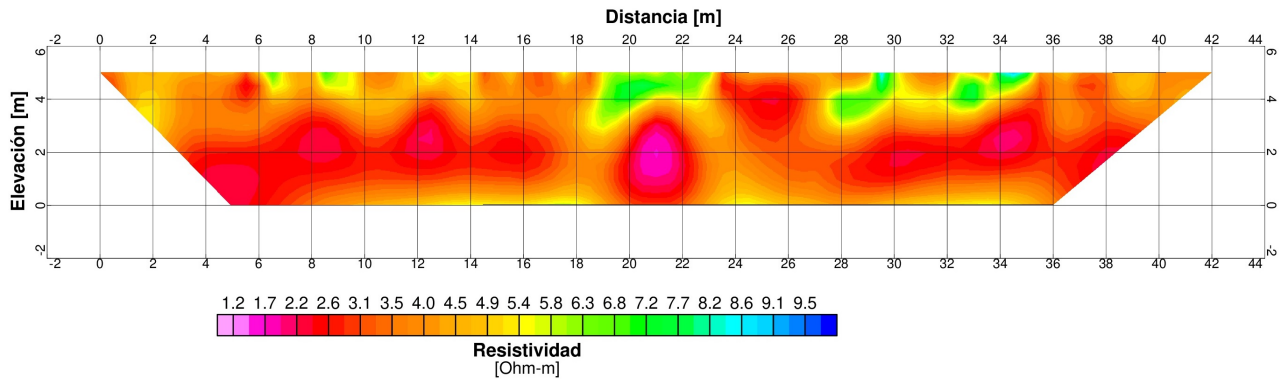
(b) Sección del grado de saturación (%) modelado a partir de la figura *a*

Figura 4.4: Los datos fueron adquiridos 15 horas comenzado el riego del fluido lixivante. La figura (b) esta ajustada con el modelo de Archie según la sección de resistividad de los valores expuestos en la figura (a). $\phi = 0,22$, $m = 1,45$ y $n = 2$

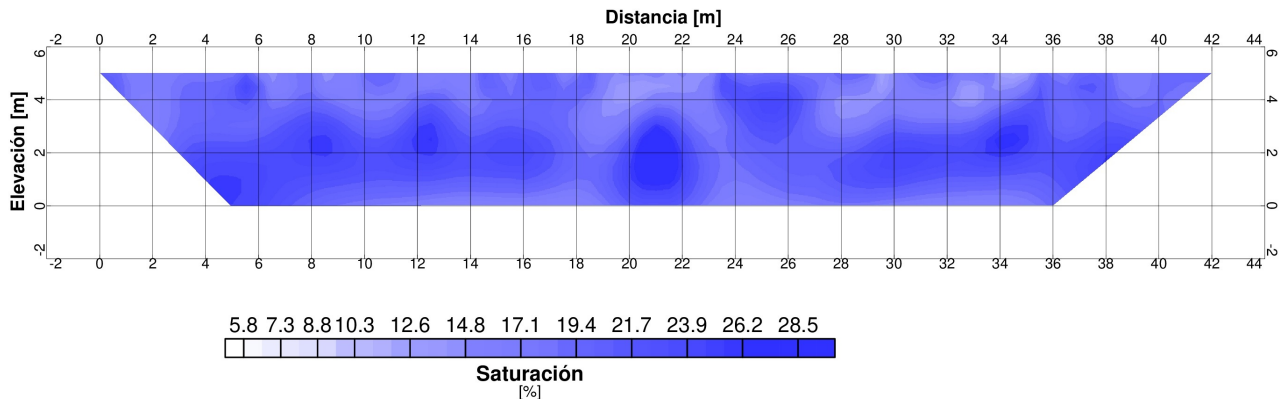
Es interesante observar, que las secciones de saturación, muestran de mejor forma la

distribución del fluido al interior de la pila, entregando una mejor aproximación del comportamiento interno del fluido.

En el Capítulo 2, se mencionó que previo a la construcción de la pila de lixiviación en las distintas faenas mineras, el material debe ser regado para formar glómeros. Además se mencionó que la pila de lixiviación, presenta un porcentaje de saturación conocido y aproximadamente de un 5 [%]. Es interesante observar la Figura 4.4.a, y compararla con su modelo de saturación 4.4.b, se puede observar que las zonas resistivas presentan un porcentaje de saturación cercano al 6 [%], lo que concuerda con lo esperado para las zonas que no estén humectadas por el fluido lixiviante, según informes de la minera.



(a) Sección de resistividad en pila de lixiviación real. Minera Amalia. Perfil cental de medición.



(b) Sección del grado de saturación (%) modelado a partir de la figura a

Figura 4.5: Los datos fueron adquiridos 24 horas comenzado el riego del fluido lixiviante. La figura (b) esta ajustada con el modelo de Archie, según la sección de resistividad de los valores expuestos en la figura (a). $\phi = 0,22$, $m = 1,45$ y $n = 2$

Conclusiones

Conclusiones

Se realizó un proceso experimental, con el objetivo de poder estimar el porcentaje de saturación para una muestra granular, a partir de resistividades eléctricas. En esta experimentación, se obtuvieron datos a partir de muchos experimentos, para los cuales, se controlaron las masas de las muestras y la cantidad de fluido a utilizar, encontrando finalmente las constantes del modelo de Archie a través de un algoritmo, cabe mencionar que estas constantes encontradas, son propias del material. Al calibrar dicho modelo, se pudo entregar un porcentaje de saturación, conociendo sólo la resistividad eléctrica de la muestra. Para validar los resultados obtenidos en este trabajo, se compararon con resultados expuestos por otros autores.

Los resultados experimentales, mostraron un cambio en la porosidad para distintos niveles de profundidad, que podría deberse a dos fenómenos observados tanto en laboratorio como en terreno: el primero, una acumulación de fluido en la zona más profunda del vaso experimental. El segundo, un ordenamiento de las partículas del material en la zona más profunda debido al peso entregado por el material de la zona superior. Ambos fenómenos, fueron observados in-situ mientras se realizaban las experimentaciones. Este cambio se atribuye a la anisotropía del material, sobre todo en la dirección vertical.

La porosidad en todo momento fue un parámetro desconocido, es decir, una de las variables del modelo de Archie que se debía encontrar. Para este fin, se realizaron dos formas diferentes para estimar la porosidad del material proveniente de la mina. La primera forma de estimación, fue calcular la porosidad por medio de los resultados en laboratorio, graficando el logaritmo de la saturación y el logaritmo del factor de formación, los cuales se recuerda, siguen una curva lineal entre ellos. Bajo ciertas condiciones impuestas por el autora al algoritmo numérico, se estimó que la porosidad tiene un valor aproximado de 0.22 en promedio. La segunda forma para poder estimar la porosidad, fue utilizando la definición de ésta (razón del volumen de poros y el volumen total de la muestra granular) y estimarla de forma experimental. En el capítulo anterior, se describe la manera que fue estimada. Esta forma de estimación, revela un valor de porosidad 0.21 en promedio. En conclusión, la porosidad que se estimó para el material proveniente de la minera Amalia es de 0.22.

Una de las observaciones anexas que se pudo apreciar en este trabajo, fue el comportamiento de los fluidos luego de ser permeados a través de las dos distintas muestras granulares (tierra común y material proveniente de la mina). Recordando que en el proceso experimental en laboratorio, se obtuvieron las conductividades de los fluidos (agua potable y líquido lixivante) antes y después de ser permeado por los sólidos. Para el caso de la tierra común, se observó que las conductividades de los fluidos disminuyeron luego de ser filtrado por este material. Por el contrario, en el caso del material proveniente de la mina, los fluidos aumentaron

su conductividad después de atravesar éste sólido. Estos comportamientos, fueron interpretados como un aumento o disminución de electrolitos en los fluidos, que fueron cedidos o captados por las muestras sólidas. Para el caso de la tierra, se concluye que este material sólido, limpia los fluidos de elementos conductores. No así, el material proveniente de la minera, que al ser un sólido que posee minerales de cobre, entrega elementos conductores al fluido permeado.

Es importante destacar el enfoque multidisciplinario que ha desarrollado el presente trabajo. A pesar de ser un trabajo de tesis del área de la geofísica, se trabajó con diferentes ciencias que permitieron obtener resultados satisfactorios en cuanto a las interpretaciones. Mecánica de suelos, hidrometalurgia, mecánica de fluidos, tomografías resistivas y química de soluciones acuosas fueron las ciencias que acompañaron el desarrollo del presente trabajo, siendo cada una de ellas, fundamentales a la hora del proceso experimental en laboratorio.

Recomendaciones

Para trabajos futuros, sería interesante poder encontrar una relación entre la porosidad y la presión que ejerce un estrato de roca superior. Con el fin de determinar como varía la saturación con respecto a la profundidad.

Una de las observaciones interesantes en la presente tesis, fue el cambio de conductividad que mostraron los fluidos, luego de ser permeados por los distintos materiales sólidos, dejando en claro que la tierra común, funciona como un colador de partículas electrolíticas. No obstante, se abre la interrogante para trabajos futuros, encontrar una relación espacial y temporal de la relación entre sólido y líquido.

Por último, para futuros trabajos en esta área, es necesario contar con un recipiente de al menos un metro, para poder observar de mejor manera la compactación del material y la acumulación de fluidos mencionadas con anterioridad.

Referencias

- Ajewole, P y PA Enikanselu (2014). "Development of Computer Application to compute Archie Parameters from Well Log Data". En: *British Journal of Earth Sciences Research* 2.1, págs. 24-37.
- Alguacil, FJ (1998). "La recuperación de cobre mediante lixiviación-extracción con disolventes-electrólisis: hacia el siglo XXI". En: *Revista de metalurgia* 34.6, págs. 499-506.
- Archie, Gustave E et al. (1942). "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". En: *Transactions of the AIME* 146.01, págs. 54-62.
- Aster, Richard C, Brian Borchers y Clifford H Thurber (2011). *Parameter estimation and inverse problems*. Vol. 90. Academic Press.
- Boudreau, Bernard P (1996). "The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments". En: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60.16, págs. 3139-3142.
- Burger, Henry Robert (1992). "Exploration geophysics of the shallow subsurface". En: Dahlin, Torleif y Bing Zhou (2004). "A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays". En: *Geophysical prospecting* 52.5, págs. 379-398.
- De Kuijper, A, RKJ Sandor, JP Hofman y JA De Waal (1996). "Conductivity of two-component systems". En: *Geophysics* 61.1, págs. 162-168.
- DÍAZ, RAMÓN ALFONSO BUGUEÑO (2015). ANÁLISIS COMPUTACIONAL Y EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE SATURACIÓN EN COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN DE DISTINTOS DIÁMETROS".
- Doyen, Philippe M (1988). "Permeability, conductivity and pore geometry of sandstone". En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93.B7, págs. 7729-7740.
- Edwards, LS (1977). "A modified pseudosection for resistivity and IP". En: *Geophysics* 42.5, págs. 1020-1036.
- Ellis, RG y DW Oldenburg (1994). "The pole-pole 3-D Dc-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach". En: *Geophysical Journal International* 119.1, págs. 187-194.
- Farquharson, Colin Gy Douglas W Oldenburg (1998). "Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure". En: *Geophysical Journal International* 134.1, págs. 213-227.
- Friedman, Shmulik Py David A Robinson (2002). "Particle shape characterization using angle of repose measurements for predicting the effective permittivity and electrical conductivity of saturated granular media". En: *Water Resources Research* 38.11.
- Huber, Peter J et al. (1964). "Robust estimation of a location parameter". En: *The Annals of Mathematical Statistics* 35.1, págs. 73-101.
- Hughes, Ifan y Thomas Hase (2010). *Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis*. Oxford University Press.
- Jackson, PD, D Taylor Smith y PN Stanford (1978). "Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands". En: *Geophysics* 43.6, págs. 1250-1268.

- Juárez Badillo, Eulalio, Alfonso Rico Rodríguez et al. (1999). *Mecánica de suelos*. Inf. téc. Lesmes, David P y Shmulik P Friedman (2005). “Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils”. En: *Water Science and Technology Library* 50, pág. 87.
- Loke, MH (1999). “Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies”. En: *A practical guide to 2*.
- López Alfaro, Emilio José (2012). Estudio Experimental de la Permeabilidad de Materiales Depositados en Pilas de Lixiviación”.
- Lyle, WD, WR Mills et al. (1989). “Effect of nonuniform core saturation on laboratory determination of the Archie saturation exponent”. En: *SPE Formation Evaluation* 4.01, págs. 49-52.
- McGillivray, Peter Robert (1992). Forward modeling and inversion of DC resistivity and MMR data”.
- O’Kane, M y C Wels (2003). “Mine waste cover system design—linking predicted performance to groundwater and surface water impacts”. En: *6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Cairns*.
- Olguin Coca, Francisco Javier (2011). “Mecánica de Suelos 1”. En:
- Onovughe, Elvis y Adekunle Sofolabo (2016). “Saturation Modelling: Using The Waxman-Smits Model/Equation In Saturation Determination In Dispersed Shaly Sands”. En:
- Revil, A, D Hermitte, E Spangenberg y JJ Cochémé (2002). “Electrical properties of zeolitized volcanoclastic materials”. En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 107.B8.
- Rojas Suárez, César Augusto et al. (2011). “Modelamiento geoestadístico de los depósitos fluviales de la zona c-formación mugrosa en el área la Cira-Este del Campo La Cira”. Tesis doct. Universidad Nacional de Colombia.
- Samouëlian, Anatja, Isabelle Cousin, Alain Tabbagh, Ary Bruand y Guy Richard (2005). “Electrical resistivity survey in soil science: a review”. En: *Soil and Tillage research* 83.2, págs. 173-193.
- Schmidt, P (2001). “Criterios de diseño de un proceso hidrometalúrgico para minerales de cobre oxidados”. En: *memoria de título para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile*.
- Schwartz, Lawrence M y Stephen Kimminau (1987). “Analysis of electrical conduction in the grain consolidation model”. En: *Geophysics* 52.10, págs. 1402-1411.
- Seladji, S, P Cosenza, A Tabbagh, J Ranger y G Richard (2010). “The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation”. En: *European journal of soil science* 61.6, págs. 1043-1055.
- Sen, PN (1981). “Relation of certain geometrical features to the dielectric anomaly of rocks”. En: *Geophysics* 46.12, págs. 1714-1720.
- Shen, Lihua y Zhangxin Chen (2007). “Critical review of the impact of tortuosity on diffusion”. En: *Chemical Engineering Science* 62.14, págs. 3748-3755.
- Silver, Richard (2013). “Unsaturated Flow Analysis of Heap Leach Soils”. Tesis doct. Boston College.
- Smith, ME y ML Steemson (2009). “PROBLEMAS GEOTÉCNICOS asociados a la LIXIVIACIÓN DE LATERITAS NIQUELÍFERAS EN PILAS OF”. En:
- Tarantola, Albert (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. SIAM.
- hydrometallurgy Perú* (2017). hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixiviacion-en-pilas/.
- Página web codelco* (2017). www.codelcoeduca.cl/.

- Waxman, MH, LJM Smits et al. (1968). "Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands".
En: *Society of Petroleum Engineers Journal* 8.02, págs. 107-122.
- Winsauer, Weldon Otto, HM Shearin Jr, PH Masson y M Williams (1952). "Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry". En: *AAPG bulletin* 36.2, págs. 253-277.
- Wyllie, MRJ y AR Gregory (1955). "Fluid flow through unconsolidated porous aggregates".
En: *Industrial & Engineering Chemistry* 47.7, págs. 1379-1388.

Apéndice A

Determinación de la Densidad del material proveniente del aglomerador

La determinación de la densidad del material proveniente del aglomerador, fue encontrada por medio del experimento efectuado por Arquímedes.

Para la resolución de este problema, fue necesario determinar la masa del material y su volumen. Para la determinación de la masa del material en distintas experimentaciones, solo se pesó el material.

Mientras tanto, para la determinación del volumen del material, se tiene una cantidad específica de agua destilada a $25^{\circ}C$ asegurando que posea una densidad de $1 \frac{g}{mL}$. En una probeta, se vierte el agua destilada, teniendo en cuenta su volumen inicial. Posteriormente se introduce el material sólido proveniente del aglomerador (ya pesado) en la misma probeta que se encuentra el agua destilada. Finalmente, se apunta el volumen desplazado de agua destilada por consecuencia del material.

Es decir, la densidad del material está dada por la siguiente ecuación:

$$D_s = \frac{Masa}{V_f - V_0}$$

donde D_s , representa la densidad del sólido, V_f presenta el volumen final y V_0 es el volumen inicial. La resta de estos últimos volúmenes, representa el volumen desplazado, en otras palabras, el volumen del material. La tabla A.1, muestra los resultados de distintas experimentaciones para la determinación de la densidad del material.

Tabla A.1: Tabla de densidad del material granular, calculada por el método de Arquímedes

Volumen inicial [mL]	Volumen Final[mL] desplazado	Masa del material [g]	Densidad Calculada
200	291	236.36	2.59
200	370	413.1	2.43
100	165	162.05	2.499
300	398	248.78	2.53

Apéndice B

Preparación del fluido lixivante

El fluido lixivante es una disolución entre agua destilada (H_2O) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esta combinación debe alcanzar un pH de 1.6 (Alguacil, 1998) , presentando una resistividad de $\rho=1.31[$

$\Omega\cdot m]$ ($\sigma = 0,731[\frac{S}{m}]$). Este pH fue seleccionado por el autor del presente trabajo, debido a que, en la literatura acerca de hidrometalurgia, se utiliza fluido lixivante con este pH.

Para la preparación del fluido lixivante utilizado en las experimentaciones de lixiviación con el material proveniente del aglomerador, se necesitó los siguientes elementos, fluidos y equipos.

1. Vaso precipitado 2 lts
2. Gotero
3. Agua destilada (H_2O) a una temperatura ambiente
4. Medidor de pH
5. Ácido sulfúrico (H_2SO_4) marca Merck con las siguientes especificaciones:
 - (a) Pureza: 95-97 [%]
 - (b) Densidad: 1.84 [Kg/l]
 - (c) PM: 98.08 [g/mol]
6. Embudo
7. Mezclador de fluidos

Elementos de seguridad

1. Lentes de seguridad
2. Guantes
3. Delantal
4. Mascarilla

A continuación, se menciona los pasos a seguir para la preparación de la solución de pH 1.6.

Se vierte 1 litro de agua destilada en el vaso precipitado, comenzando a girar el mezclador de soluciones. El ácido sulfúrico, comienza a precipitarse por medio del gotero. Gota a gota, se examina el pH que presenta la solución, deteniendo el goteo hasta alcanzar el pH necesario.