



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD Y PERMITIVIDAD RELATIVA DEL
SUELO PARA RADIOTELESCOPIO MIST

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

FELIPE IGNACIO LUCERO DÍAZ

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENA MENA

PROFESOR CO-GUÍA:
RICARDO BUSTOS PLACENCIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
TOMÁS CASSANELLI ESPEJO
FRANCISCO PIZARRO TORRES

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los fondos ANID Chile Proyecto Quimal
180003, UCSC BIP-106, ASTRO21-0053 y ASTRO20-0075

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA Y MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

Este trabajo surge de la necesidad de determinar la influencia de las características eléctricas del suelo, conductividad y permitividad relativa, donde se instale el radiotelescopio MIST. Este radiotelescopio tiene como objetivo detectar la señal global de 21 cm, uno de los objetivos cruciales en la cosmología moderna para comprender la evolución del universo tal como lo conocemos hoy. En esta investigación, se exploraron dos formas de medir estas características eléctricas. La primera fue el método de Schlumberger para la medición de conductividad. El segundo método fue estudiando la reflectometría en dominio de la frecuencia para determinar la permitividad relativa en el rango 50-120 MHz. Se llevaron a cabo mediciones preliminares en terrenos en la ciudad de Santiago, incluyendo la medición de la permitividad relativa del aire y del agua, obteniéndose resultados consistentes con resultados encontrados en la literatura. Estos métodos y técnicas fueron aplicados para determinar la conductividad y permitividad relativa en sitios de observación de MIST, California y Nevada, Estados Unidos. Se demostró que estas dos técnicas son prácticas y adecuadas y, además, proporcionaron resultados favorables. Este trabajo resalta la importancia de profundizar en esta línea de investigación para mejorar la observación de la línea de 21 cm.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que han hecho posible el desarrollo de este trabajo.

Primero quiero agradecer a mis padres por estar siempre conmigo en este proceso. Quienes fueron quienes me motivaron desde pequeño a aspirar a ser una gran persona y un buen profesional, sin ellos nada de esto podría ser posible.

A mi polola Daniela, quien siempre ha sido un apoyo incondicional desde el principio. Dándome la motivación necesaria las veces que era necesario.

Al profesor Ricardo y al profesor Patricio, por darme la posibilidad de trabajar juntos en este proyecto. Haber trabajado con ellos ha influenciado enormemente en mi carrera, de maneras que jamás habría pensado.

A Mauricio, quien fue parte crucial en las mediciones de esta tesis. Siempre estuvo dispuesto a ayudarme cuando lo necesité. Lamentablemente hoy no está con nosotros, pero nunca me olvidaré de su importante apoyo en este trabajo.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a todos aquellos que no he nombrado pero me han apoyado desde el principio en todas mis metas y ambiciones.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Amanecer cósmico y la Época de Reionización	1
1.1.1. Importancia de la época de reionización	2
1.1.2. Fundamentos físicos del hidrógeno neutro y principales características de la EoR	2
1.1.3. Línea de 21 cm. para detectar la EoR	5
1.2. Medir la señal global de 21 cm.	7
1.2.1. Métodos para la detección de la señal global de 21 cm.	7
1.2.2. Diferentes proyectos alrededor del mundo	9
1.3. MIST	11
1.3.1. Configuración	11
1.3.2. Posibles localizaciones para el instrumento	14
1.3.3. Requerimientos de la antena	14
1.3.4. Influencia de las características del suelo y plano tierra conductor	18
1.4. Problema a Abordar	21
1.5. Hipótesis	22
1.6. Objetivos	22
1.6.1. Objetivo General	22
1.6.2. Objetivos específicos	22
1.7. Resultados esperados	23
1.8. Estructura de esta Tesis	23

2. Estado del Arte	24
2.1. Métodos para obtener la conductividad DC	24
2.1.1. Método de Wenner	25
2.1.2. Método de Schlumberger	26
2.1.3. Sondeo Eléctrico Vertical	27
2.2. Métodos para obtener la permitividad relativa	28
2.2.1. Comparación de los diferentes métodos	31
2.3. Mediciones del suelo con líneas de transmisión	33
2.3.1. Reflectometría como método para determinar la permitividad	36
2.4. Resumen	38
3. Metodología	39
3.1. Conductividad	39
3.1.1. Método de Schlumberger	40
3.1.2. Sondeo eléctrico vertical	40
3.1.3. Terrenos medidos	42
3.2. Permitividad relativa del suelo	44
3.2.1. Reflectometría en dominio de la frecuencia	44
3.2.2. Simulación	46
3.2.3. Particle swarm optimization	48
3.2.4. Terrenos medidos	50
3.3. Comprobación de los Métodos	50
3.3.1. Método de Schlumberger	50
3.3.2. Método de Reflectometría	51
3.3.3. Validez de los datos preliminares	53
3.4. Resumen	54
4. Resultados, Análisis y Discusión	55

4.1.	Resultados para la conductividad del suelo	55
4.1.1.	Resultados en Deep Springs	56
4.1.2.	Resultados en Death Valley	57
4.2.	Resultados para la permitividad del suelo	58
4.2.1.	Deep Springs	59
4.2.2.	Death Valley sin corrección del cable	59
4.2.3.	Death Valley con corrección de cable	60
4.3.	Discusión	64
4.3.1.	Deep Springs	64
4.3.2.	Death Valley	65
4.3.3.	Discusión general	66
4.4.	Resumen	67
5.	Conclusión y Trabajo futuro	68
5.1.	Trabajo Futuro	69
	Bibliografía	70
	Anexo: Fórmulas para la resistividad de Wenner y Schlumberger	75

Índice de Tablas

1.1.	Tabla comparativa de los experimentos que se encuentran trabajando en la detección de la señal global, utilizando una sola antena.	9
1.2.	Tabla comparativa de los experimentos trabajando en la detección de la señal de 21 cm. con un interferómetro.	10
1.3.	Resumen requisitos deseados de la antena de MIST	15
2.1.	Tabla comparativa de los diferentes métodos para medir la permitividad dieléctrica de un material	33
3.1.	Tabla de datos utilizada para las mediciones con el método de Schlumberger, a es la distancia entre los electrodos interiores, mientras que la distancia entre los electrodos interior y exterior es na , $AB/2$ es la mitad de la distancia entre los electrodos externos, R es la resistencia aparente y ρ_W es la resistividad aparente entregada por el método. Estas mediciones son posteriormente procesadas en algún programa de interpretación de datos de sondeo eléctrico vertical. . . .	41
3.2.	Datos entregados por IPI2Win para la estructura de tres capas utilizando el método de Schlumberger para la cancha de fútbol. Error = 2.15 %.	51
4.1.	Datos entregados por IPI2Win para la estructura de tres capas en el sitio Deep Springs, utilizando el método de Schlumberger. Error = 2.33 %.	56
4.2.	Datos entregados por IPI2Win para la estructura de dos capas en el sitio Death Valley, utilizando el método de Schlumberger. Error = 4.5 %.	57
4.3.	Datos entregados por IPI2Win para la estructura de tres capas en el sitio Death Valley, utilizando el método de Schlumberger. Error = 3.29 %.	58
4.4.	Resumen de todos los valores para la conductividad y permitividad relativa encontradas. La columna de σ_S corresponde a la conductividad determinada por el método de Schlumberger. Las columnas de σ_R y ε_R corresponden a la conductividad y permitividad respectivamente encontrada por el método de reflectometría.	64

Índice de Ilustraciones

1.1. Línea de tiempo del universo. Después de 380,000 años desde el Big Bang, el universo consistía principalmente de hidrógeno, helio y materia oscura. Del hidrógeno presente se forman las primeras estrellas y galaxias, cuya radiación calienta el medio intergaláctico (IGM). Al nacimiento de estas primeras estrellas se le conoce como el amanecer cósmico, cuyo periodo se puede medir teóricamente gracias a la interacción de la radiación presente con el hidrógeno neutro. Extraído de: NAOJ	2
1.2. Diagrama de nivel energético para la línea hiperfina del estado fundamental del átomo de hidrógeno. El estado en el cual el electrón y el protón están alineados, tiene ligeramente mayor energía. Esta transición corresponde a una frecuencia de 1420 MHz, con una longitud de onda de 21 cm. Extraído de [7].	3
1.3. Diagrama de niveles ilustrando el mecanismo de Wouthuysen-Field, donde se muestran las transiciones hiperfinas de los niveles 1S y 2P. Las líneas sólidas muestran las posibles transiciones que permiten un cambio de espín, mientras que las líneas punteadas muestran transiciones posibles pero que no contribuyen a un cambio del espín. Extraído de [3].	4
1.4. Modelo referencial de la señal global de 21 cm. Aunque este modelo debe encontrar las características esenciales de la señal, los detalles precisos aun deben ser confirmados y dependen de la naturaleza de las primeras estrellas y galaxias. Extraído de [8].	5
1.5. Tiempo cósmico como función del redshift z según la ecuación 1.4. Extraído de [2].	6
1.6. La señal global de 21 cm como función del redshift z para un caso estándar (línea negra), con los puntos rojos marcando los puntos de inflexión (el máximo en un z alto, el mínimo global, y el máximo en z bajo). Las líneas celestes indican el conjunto de diferentes simulaciones para otros 193 modelos astrofísicos. Extraído de [5]	8
1.7. Característica de absorción medida por EDGES [14] en el rango de frecuencias de 50-100 MHz correspondiente al rango de redshift $13 < z < 27$. Comparado con los modelos típicos de la señal global, tanto la forma como la amplitud difieren con lo esperado. Extraído de [14].	10

1.8. (a): Representación artística del observatorio DARE. Una estrategia para medir la señal global de 21 cm desde el espacio. La antena consiste en un par de bicónicas cruzadas. (b): Representación artística del observatorio HERA, un interferómetro de 320 elementos destinado a la medición de la línea de 21 cm. Extraído de [20] y [18].	11
1.9. Diagrama de bloques en detalle del Front-end y Back-End de MIST, en el Front-End la señal recibida desde la antena es amplificada por el LNA y filtrada, luego en el Back-End es digitalizada en la ADC y procesada en el PC, con ayuda de la GPU. Extraído de [10].	12
1.10. Diagrama y detalle de las dimensiones de la antena, receptor y balún de MIST [10].	14
1.11. Localización aproximada de MARI, a 135 km de San Pedro de Atacama. . .	15
1.12. Sitios para el proyecto MIST y sus derivaciones, a la izquierda una foto de un posible sitio cercano al cerro armazones, en el desierto de Atacama. A la derecha, el sitio MARS en el ártico Canadiense [24].	15
1.13. Patrón de radiación para una antena dipolo infinitesimal sobre diferentes planos de tierra. Se puede apreciar que tanto las características dieléctricas de la interfaz como la conductividad de esta influye notablemente en el patrón total. Extraído de [28]	19
1.14. Ganancia máxima de la antena en función de la frecuencia para diferentes valores de conductividad y permitividad relativa del suelo. Se puede apreciar que existe gran diferencia al variar estos valores. Créditos a Matheus Pessoa.	20
1.15. Rango típico de los valores de la conductividad y la permitividad relativa de distintos materiales [29]	20
2.1. Método de Wenner de cuatro electrodos utilizado ampliamente para obtener la resistividad aparente del suelo. Mediante este método es posible calcular una resistencia aparente V/I , utilizada para obtener la resistividad [31].	25
2.2. Método de Schlumberger de cuatro electrodos, utilizado ampliamente para obtener la resistividad aparente del suelo. Mediante este método es posible calcular una resistencia aparente V/I , utilizada para obtener la resistividad. [31]	26
2.3. Modelo ideal de capas horizontales de diferente conductividad. El sondeo eléctrico vertical ayuda a estimar las resistividades, así como también el espesor y número de capas.	27
2.4. Ejemplo de curvas patrón para una estructura de tres capas. Extraído de [34].	28

2.5. Configuraciones utilizadas para medir las características dieléctricas de los materiales utilizando el método de espacio libre [40]. (Arriba) En esta configuración se aprovecha la transmisión de la onda por el material. (Abajo) En esta segunda configuración se aprovecha la reflectividad del material a examinar. Extraído de [40].	29
2.6. Configuración de una cavidad resonante para medir la permitividad compleja, donde se mide el cambio de la frecuencia de resonancia f_c y del factor de calidad Q_0 del resonador. Con estos parámetros es posible determinar la permitividad compleja de una muestra. Extraído de [40].	30
2.7. Método de placas paralelas para medir la permitividad compleja de una muestra. Se mide su admitancia Y en función de la capacitancia y conductancia de la muestra, parámetros con los cuales se puede obtener la permitividad compleja. Extraído de [40].	30
2.8. Sonda coaxial utilizada para estudiar la permitividad compleja del material a estudiar. Extraído de [40].	31
2.9. Usualmente la técnica a elegir depende de factores como, la frecuencia de interés, el valor esperado de ρ , la precisión requerida, las propiedades del material, el estado en que se encuentre el material (líquido, polvo, sólido, placas), restricciones del material, destructivo o no destructivo, de contacto o sin contacto. Adaptado de [41].	32
2.10. Modelo utilizado en teoría de líneas de transmisión, (a) Es el modelo bifilar, ya que todas las líneas de transmisión tienen al menos dos conductores. (b) Es el modelo circuital de elementos concentrados. Extraído de [43].	34
2.11. Esquema de una línea de transmisión bifilar, donde a representa el radio de cada conductor, y D la separación entre estos.	35
2.12. Coeficiente de reflexión de la sonda de línea de transmisión para medir la permitividad usando la técnica de reflectometría de dominio de frecuencia (línea continua) , las diferentes iteraciones de las simulaciones buscan converger al coeficiente de reflexión medido para estimar los parámetros del suelo. Extraído de [46].	37
2.13. Configuración para mediciones de las características dieléctricas, usando la técnica de reflectometría de dominio de tiempo (TDR). La técnica consiste en medir el retardo en el tiempo de un pulso entregado a una línea de transmisión, este retardo es utilizado para obtener los parámetros de la línea y así la permitividad compleja. El mismo equipamiento puede ser utilizado para medir con la técnica de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR). Extraído de [47].	37
2.14. Ancho de banda de los diferentes métodos a utilizar. El método de TDR al enviar pulsos en el tiempo, puede ocupar un gran ancho de banda quizás no deseado. Extraído de [44].	38

3.1. Telurímetro FLUKE modelo 1625 utilizado en la medición de la conductividad DC del suelo	40
3.2. Captura de pantalla del software utilizado para el interpretación de datos del Sondeo Eléctrico Vertical, utilizado tanto para el método de Wenner como el de Schlumberger. Este caso corresponde a un modelo de cuatro capas del suelo. El eje horizontal representa la distancia, tanto para la curva de resistividad (en rojo y negro) como para representar el espesor de cada capa (en azul).	42
3.3. Terrenos medidos con el método de Schlumberger	43
3.4. Localización aproximada de los sitios candidatos medidos para el radiotelescopio MIST	43
3.5. Diagrama de la línea de transmisión a utilizar como sonda en el suelo.	45
3.6. Línea de transmisión de 25 cm. con separador plástico utilizada en la mediciones de suelo.	45
3.7. VNA utilizado para las mediciones en dominio de frecuencia, modelo NanoVNA	46
3.8. Modelo CAD utilizado en HFSS, donde se puede apreciar el detalle geométrico implementado en la simulación. Para una mejor visualización, se ocultó el separador de PLA presente en la simulación.	47
3.9. Diagrama de flujo para la implementación del PSO	49
3.10. Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio denominado Cancha de Fútbol en Santiago de Chile. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de tres capas.	51
3.11. Resultados de la optimización PSO para aire.	52
3.12. Resultados de la optimización PSO para agua potable.	52
3.13. Resultados de la optimización PSO para el sitio Cancha de Fútbol en la ciudad de Santiago.	53
4.1. Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio de Deep Springs en California. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de tres capas.	56
4.2. Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio de Death Valley en Nevada. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de dos capas.	57

4.3. Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio de Death Valley en Nevada. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de tres capas.	58
4.4. Resultados de la optimización PSO para el sitio Deep Springs en el desierto de California.	59
4.5. Resultados de la optimización PSO para el sitio Death Valley en el desierto de Nevada. En ambos gráficos se puede apreciar una anomalía entre 80-90 MHz. Esta se discutirá en la sección siguiente.	60
4.6. Medición real e imaginaria para el sitio Death Valley, en extensión completa, en el rango 20-220 MHz.	61
4.7. Segunda medición del S_{11} para el sitio Death Valley luego de encontrar la anomalía, en el rango 20-220 MHz. Se pueden apreciar nuevamente las ondulaciones cada ≈ 65 MHz.	61
4.8. Curvatura realizada al cable que permitió una correcta medición con el método de reflectometría. Es importante aclarar que este cable fue el mismo utilizado en las campañas del sitio Death Valley.	62
4.9. Mediciones real e imaginaria, para un sitio aleatorio en Chile. Incluso cuando la configuración del VNA o la sonda no ha cambiado se puede apreciar una diferencia en las reflexiones cuando el cable se encuentra curvo o recto. . . .	62
4.10. Mediciones de Death Valley, después de extraer el efecto de la curvatura del cable en las mediciones originales.	62
4.11. Resultados de la optimización PSO para el sitio Death Valley, después de la eliminación del efecto del cable torcido. (Arriba) En estos gráficos se pueden ver curva para el mejor ajuste de acuerdo al PSO, además de una comparación con las curvas antes de la corrección. (Abajo) En estos gráficos podemos ver la diferencia entre ambas curvas de ajuste del PSO.	63

Capítulo 1

Introducción

En el modelo de la línea de tiempo del universo (Fig. 1.1), después de 380,000 años desde el Big Bang, este pasó de ser opaco y compuesto principalmente de partículas elementales para después de 100 millones de años formar las primeras estrellas y galaxias. Este momento se conoce como el fin de la época oscura, dando paso a la época de reionización, donde la radiación proveniente de las primeras estrellas comienza a ionizar el medio intergaláctico. Uno de los desafíos en la actualidad es tener alguna prueba o señal que compruebe que tal época ocurrió. En este capítulo se introducirá al problema general que aborda esta tesis así como también las diferentes aproximaciones que existen para medir esta señal y los desafíos asociados, entre los que se encuentra el enfoque de esta tesis, como lo es la caracterización eléctrica del suelo donde se encuentra el telescopio.

1.1. Amanecer cósmico y la Época de Reionización

La época de reionización (EoR, por sus siglas en Inglés *Epoch of Reionization*) es un proceso que vivió el universo entre $z = 30$ y $z = 6$,¹ [1] desde los 100 hasta los 1000 millones de años después del Big Bang [2]. En esta época, el hidrógeno presente en el universo pasó de ser neutro a estar completamente ionizado como lo conocemos hoy. Al inicio de este proceso se caracteriza por su relación directa con la formación de las primeras estrellas y galaxias, lo que se conoce como *Amanecer Cósmico*. En esta sección se discutirá la importancia de la época de reionización y su relación con el amanecer cósmico. También se revisará cómo y cuándo el hidrógeno de nuestro universo, pasó de ser neutro a ionizarse como lo conocemos hoy. Esta es una de las preguntas aún sin responder en cosmología.

¹El corrimiento al rojo z tiene directa relación con el tiempo cósmico, mientras más alto es el corrimiento al rojo, más se observa hacia el pasado. Esto se discutirá en mas detalle en la sección 1.1.3. En el desarrollo de este capítulo, se puede considerar el corrimiento al rojo $z = 30 \approx 100$ millones de años desde el Big Bang, y $z = 6 \approx 1000$ millones de años desde el Big Bang

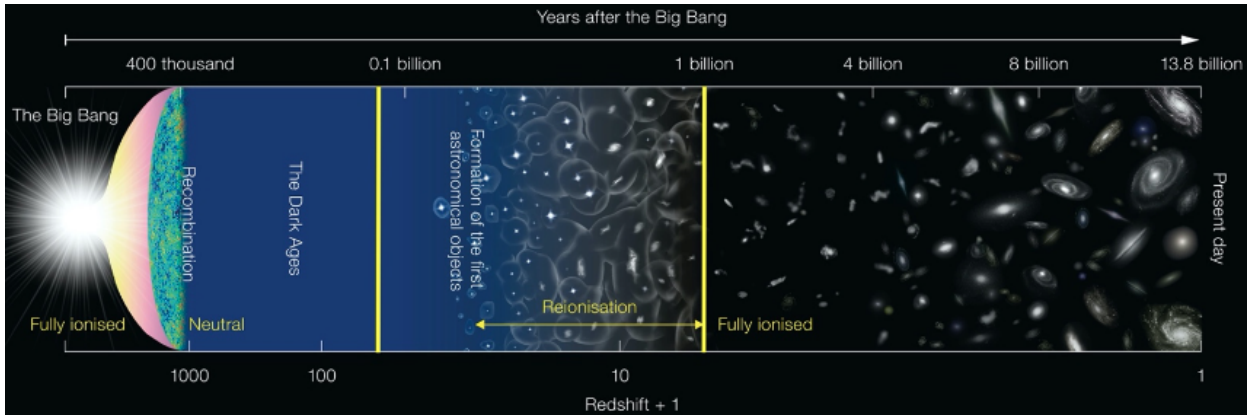


Figura 1.1: Línea de tiempo del universo. Después de 380,000 años desde el Big Bang, el universo consistía principalmente de hidrógeno, helio y materia oscura. Del hidrógeno presente se forman las primeras estrellas y galaxias, cuya radiación calienta el medio intergaláctico (IGM). Al nacimiento de estas primeras estrellas se le conoce como el amanecer cósmico, cuyo periodo se puede medir teóricamente gracias a la interacción de la radiación presente con el hidrógeno neutro. Extraído de: NAOJ

1.1.1. Importancia de la época de reionización

Dentro de la cronología del Big Bang, luego de la Recombinación (formación de los primeros átomos de hidrógeno y helio a partir de las partículas del Big Bang) le sigue la edad oscura, una época donde casi no existe materia ionizada. A medida que la materia se condensa en cúmulos debido a la gravedad del universo se empiezan a formar las primeras estrellas y galaxias [3]. Este proceso, marca el final de la edad oscura y comienza la época de reionización de los átomos de hidrógeno [4].

Para las épocas más interesantes dentro de la línea de tiempo del universo, tanto para la edad oscura como para la época de reionización existen sólo modelos teóricos que las pueden explicar. Hay un vacío observacional de estas épocas que no han permitido restringir alguna de las variables que las afectan y por ende, hay falta de información y estudios directos [5].

Es importante el estudio y observación de esta época por su relación con el *Amanecer Cósmico* y la primera generación de estrellas y galaxias. Es a partir de este momento que el universo empieza a ser más dinámico tal como lo conocemos hoy y también la física tras todos los procesos es más compleja y dominante. Si bien se sabe que las primeras estrellas podrían haber surgido cercano a $z \sim 65$ [6], dando un límite superior de tiempo el inicio de la reionización, aún falta definir cuándo y cómo ocurrió la reionización.

1.1.2. Fundamentos físicos del hidrógeno neutro y principales características de la EoR

Considerando que la formación de las primeras estructuras a gran escala, como estrellas, galaxias y agujeros negros se relaciona directamente con el proceso de reionización, en esta

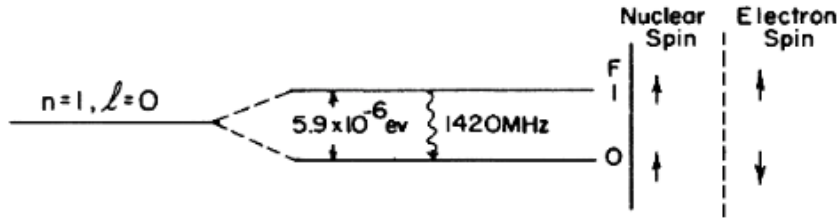


Figura 1.2: Diagrama de nivel energético para la línea hiperfina del estado fundamental del átomo de hidrógeno. El estado en el cual el electrón y el protón están alineados, tiene ligeramente mayor energía. Esta transición corresponde a una frecuencia de 1420 MHz, con una longitud de onda de 21 cm. Extraído de [7].

sección se intentará explicar esta época, que consiste en la transición del hidrógeno neutro H_I ² a hidrógeno ionizado H_{II} como lo está en el universo en nuestros días. Además se discutirá sobre la física del átomo de hidrógeno, en particular la transición del espín que origina la línea de 1420 MHz o línea de 21 cm.

Hidrógeno neutro

El hidrógeno neutro es el átomo neutro más simple que puede existir, consiste de un protón y un electrón. Si bien la característica principal del período de reionización es la transición del hidrógeno neutro a ionizado, una de las trazas importantes a medir es la transición del espín dentro del hidrógeno neutro, pues es esta transición que genera la línea de 21 cm.

En la Fig. 1.2, se muestra un diagrama de nivel energético que grafica la diferencia de energías para las dos posibles orientaciones del espín, paralelo al espín del núcleo o antiparalelo al espín del núcleo, siendo esta última la de menor energía [7]. Esta transición es explicada por el mecanismo Wouthuysen-Field [3] ilustrado en la Fig. 1.3, siendo de una variación de energía $\Delta E = 5,9 \cdot 10^{-6}$ eV equivalente en el laboratorio a una frecuencia aproximada de 1420 MHz correspondiente a una longitud de onda de 21 cm. Una explicación mas detallada de este fenómeno se puede encontrar en [3].

Principales características de la Reionización

En la Fig. 1.4 se aprecia una línea temporal con las principales características esperables en el proceso de amanecer cósmico y la época de reionización. Es importante recordar que la característica de emisión y absorción del Hidrógeno Neutro es con respecto al fondo cósmico. Durante la época oscura $200 \leq z \leq 30$, donde en el universo dominaba la materia por sobre la luz haciéndolo opaco [7], y mientras el universo se expande la temperatura del medio intergaláctico decae, lo que se traduce en una característica de emisión del hidrógeno neutro. Luego de la edad oscura, las primeras estructuras luminosas de gran escala emergieron [3] calentando el medio intergaláctico afectando al hidrógeno neutro en el ambiente, por lo que

²Siendo I en número romano, se lee H *uno*, de forma similar ocurre con H_{II}

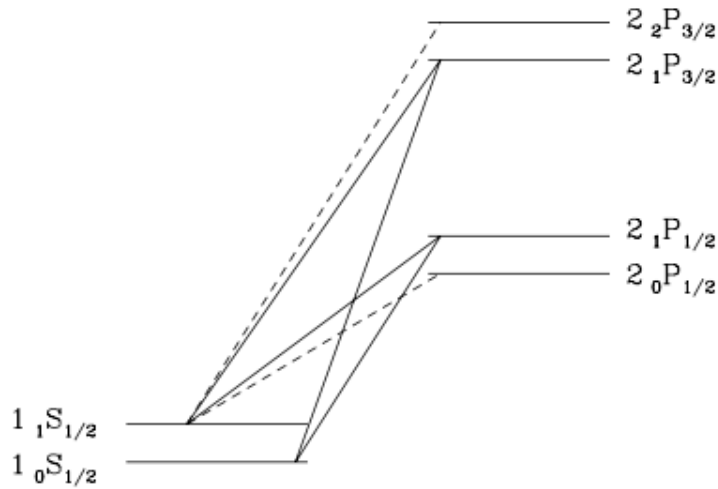


Figura 1.3: Diagrama de niveles ilustrando el mecanismo de Wouthuysen-Field, donde se muestran las transiciones hiperfinas de los niveles 1S y 2P. Las líneas sólidas muestran las posibles transiciones que permiten un cambio de espín, mientras que las líneas punteadas muestran transiciones posibles pero que no contribuyen a un cambio del espín. Extraído de [3].

podemos ver una característica de absorción cercana a $z \sim 20$. Sin embargo, a medida que se calienta el hidrógeno, probablemente por los rayos X producto de los primeros agujeros negros [8], se puede apreciar una ligera característica de emisión. Luego, a medida que el hidrógeno neutro se desvanece en la época de reionización, también lo hace la emisión en $z \leq 6$ ya que la totalidad del hidrógeno se encuentra ionizado. Un modelo cuantitativo de las características de emisión o absorción como diferencia de temperatura respecto al fondo de microondas se muestra en la sección 1.1.3.

Estudio de la línea de 21 cm.

El estudio de la línea de 21 cm. del hidrógeno es de gran importancia en la astronomía y en particular en cosmología [9]. El hidrógeno, al ser el elemento más abundante en el universo, su estudio se transforma en una traza fundamental que sirve para medir velocidades radiales mediante efecto Doppler, medir la densidad de hidrógeno neutro y estimar la masa de galaxias [7].

En cosmología la línea del hidrógeno también juega un papel importante a la hora de determinar con precisión la línea temporal del universo. El átomo de hidrógeno como tal existe desde la época de recombinación³, por lo que en teoría, sería posible observar la historia del universo a partir de los 400.000 años desde el Big Bang estudiando la línea de 21 cm del

³Si bien, el nombre *Recombinación* da a entender que alguna vez se combinaron protones y electrones formando átomos de hidrógeno, el universo era demasiado caliente para permitir un átomo neutro estable [7].

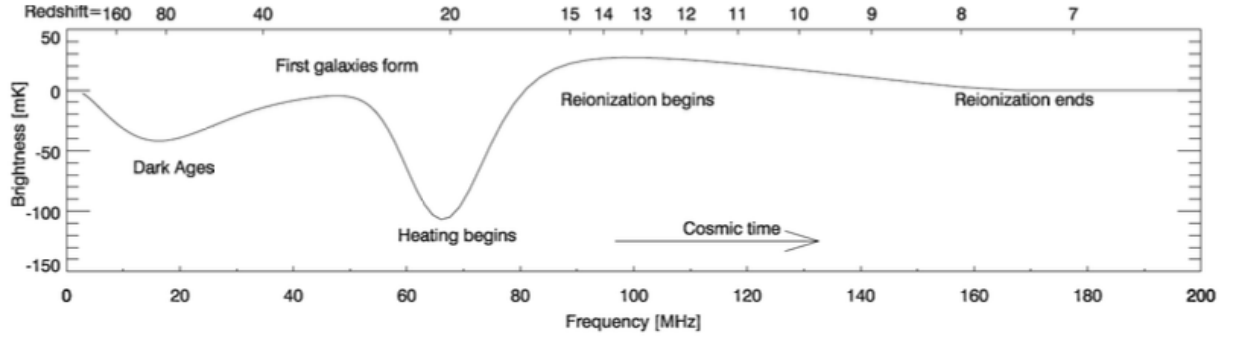


Figura 1.4: Modelo referencial de la señal global de 21 cm. Aunque este modelo debe encontrar las características esenciales de la señal, los detalles precisos aun deben ser confirmados y dependen de la naturaleza de las primeras estrellas y galaxias. Extrído de [8].

hidrógeno. En la siguiente sección se discutirá acerca de los desafíos instrumentales de medir la señal global de 21 cm.

1.1.3. Línea de 21 cm. para detectar la EoR

A continuación se discutirá sobre la técnica para detectar la señal global de 21 cm y luego, de los desafíos técnicos e instrumentales y las diferentes maneras de lograrlo. También se relacionará el estudio de esta señal con el tiempo cósmico, el corrimiento al rojo z y la distancia astronómica a la que se observa. Es necesario remarcar que este método de detección es sobre el cual se basa el instrumento que genera esta tesis, MIST [10], del cual se hablará en la sección 1.3.

Relación entre redshift, frecuencia, distancia y tiempo.

Como ya se expuso en secciones anteriores, la frecuencia equivalente a la transición del espín en el hidrógeno sin perturbaciones es $f_H = 1\,420\,405\,751$ Hz[11].

Si consideramos el efecto Doppler debido a la expansión del universo, la frecuencia medida en la tierra está dada por

$$f_{obs} = f_{emi} \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}, \quad (1.1)$$

donde f_{emi} es la frecuencia en reposo de la fuente (f_H en este caso), v es la velocidad de la fuente y c es la velocidad de la luz. La ecuación 1.1 implica que existe una diferencia en frecuencia si es que existe una velocidad de la fuente con respecto al observador. Esta diferencia en frecuencia es cuantificada por el *redshift* o *corrimiento al rojo* z , una cantidad adimensional muy utilizada en astrofísica y se define como

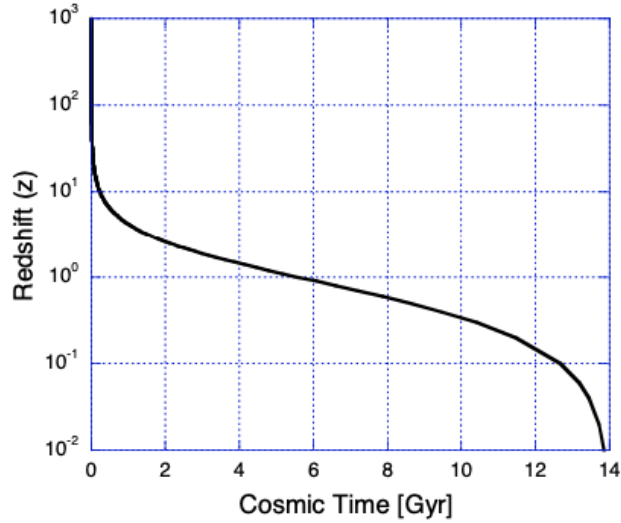


Figura 1.5: Tiempo cósmico como función del redshift z según la ecuación 1.4. Extraído de [2].

$$z = \frac{f_{emi} - f_{obs}}{f_{obs}}. \quad (1.2)$$

Un corrimiento al rojo ($z > 0$) implica que la fuente se aleja del observador, y un corrimiento al azul ($z < 0$) implica que la fuente se acerca al observador.

Si además consideramos que el universo se expande a un ritmo dependiente de la distancia, según la ecuación $v = H_0 x$ donde x la distancia y H_0 la constante de Hubble, esto significa que a medida que más lejos se observe, a mayor velocidad se alejará la fuente. Sumado a este punto, se debe tener en cuenta la finitud de la velocidad de la luz, implicando que a medida que más lejos se observe, más hacia el pasado se está observando. Este es uno de los principios fundamentales en la cosmología observacional. A partir de lo expuesto anteriormente se puede derivar la siguiente ecuación para el tiempo cósmico [2],

$$t = \frac{2H_0^{-1}}{1 + (1 + z)^2}, \quad (1.3)$$

donde t es el tiempo desde el Big Bang. Si además consideramos $H_0 = 70 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$ [2] se obtiene que,

$$t \approx \frac{28}{1 + (1 + z)^2} \text{Gyr}. \quad (1.4)$$

De esta forma, la edad del universo según el corrimiento al rojo observado se puede apreciar en la Fig. 1.5.

Comportamiento de la línea de 21 cm con el redshift z .

Aplicando la definición de corrimiento al rojo a la frecuencia de 1420 MHz, la frecuencia según diferentes valores de redshift sería

$$f_{obs} = \frac{1420}{z + 1} \text{ MHz.} \quad (1.5)$$

Tomando los límites para el proceso de reionización $30 > z > 6$ [12], esta ventana de observación queda en el espectro $25 < f < 105$ MHz.

Modelos de la señal global

La señal global de 21 cm al ser una característica de emisión o absorción dependiendo del caso, se mide con respecto a la radiación de fondo de microondas, como una diferencia en temperatura δT_b . En uno de los modelos más simplificados se expresa como [5]

$$\delta T_b \approx 27 x_{HI} \left(\frac{T_s - T_{CMB}}{T_s} \right) \left(\frac{1 + z}{10} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.6)$$

donde x_{HI} es la fracción de hidrógeno neutro, T_s es la temperatura de espín (es decir, es la temperatura necesaria para activar la transición del espín), T_{CMB} es la temperatura del fondo cósmico de microondas y z es el corrimiento al rojo. Vale decir que todas estas cantidades dependen también del corrimiento al rojo, por lo que dependen del tiempo cósmico observado y la frecuencia. En la Fig. 1.6 se puede apreciar una simulación de un modelo de esta señal global (línea negra) además de otros 193 diferentes casos utilizando otros modelos astrofísicos [5], lo que denota la importante influencia de las variables asociadas, que además demuestra el poco conocimiento acerca de esta época del universo.

1.2. Medir la señal global de 21 cm.

Debido a las frecuencias involucradas en la detección de la señal de 21 cm, el problema de instrumentación cae dentro de la radioastronomía. Existen diferentes esfuerzos alrededor del mundo que buscan solucionar este problema [8]. En esta sección se expone de forma general las formas de medir esta señal global. Además se presentan los diferentes proyectos alrededor del mundo y su estado de avance.

1.2.1. Métodos para la detección de la señal global de 21 cm.

Debido a que la señal de 21 cm. puede ser medida en cualquier dirección del cielo y es posible, incluso, utilizar una sola antena con un haz de radiación ancho [13], es atractivo

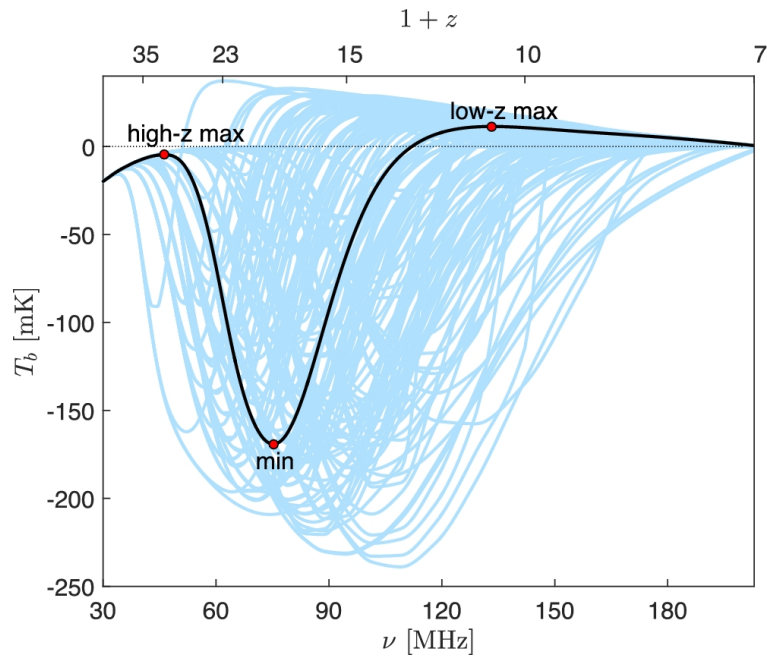


Figura 1.6: La señal global de 21 cm como función del redshift z para un caso estándar (línea negra), con los puntos rojos marcando los puntos de inflexión (el máximo en un z alto, el mínimo global, y el máximo en z bajo). Las líneas celestes indican el conjunto de diferentes simulaciones para otros 193 modelos astrofísicos. Extraído de [5]

para varios grupos alrededor del mundo llevar a cabo la construcción de un radiotelescopio. Existen dos principales métodos para medir la señal global, radiotelescopio de una sola antena e interferómetro. Acá se describe brevemente las ventajas y desventajas para cada aproximación.

Radiotelescopio de una sola antena

Ventajas Al ser solo una antena, se disminuyen los costos de construcción y electrónica, favoreciendo a proyectos de bajo presupuesto desarrollar el radiotelescopio; las frecuencias necesarias permiten que las dimensiones de la antena sean prácticas, menor o igual a 2 m., en comparación con otros radiotelescopios de varias decenas de metros; no se necesita una antena muy direccional.

Desventajas El ancho de banda hace difícil poder mantener un comportamiento acromático del haz, requerimiento que se discute en detalle en secciones posteriores.

Radiotelescopio interferométrico

Ventajas Con un arreglo interferométrico es posible incorporar algún tipo de circuito que pueda conformar el haz (*beamforming*). Es también posible usar haces escalados a todas las

Experimento	Banda	Localización
EDGES	50-100, 100-200 MHz	Murchison Radio Observatory, Australia
LEDA	30-88 MHz	Owens Valley, Estados Unidos
SARAS	87.5-175 MHz	Gauribidanur Observatory, India
BIGHORNS	50-200 MHz	Western Australia
DARE	40-120 MHz	Órbita Lunar
MIST	25-105 MHz	Ártico, California, Nevada y Chile

Tabla 1.1: Tabla comparativa de los experimentos que se encuentran trabajando en la detección de la señal global, utilizando una sola antena.

frecuencias, de tal forma que se pueda muestrear la misma porción del cielo para todas las frecuencias.

Desventajas Es técnicamente mas complejo y costoso, la construcción de varias antenas implica mucho mayor esfuerzo y financiamiento.

Además, como una desventaja para ambas aproximaciones, en aquella banda de frecuencias existe mucha interferencia de radio frecuencias (señal comercial FM, televisión y telecomunicaciones), lo que hace necesario un lugar muy silencioso.

1.2.2. Diferentes proyectos alrededor del mundo

Actualmente alrededor del mundo existen varios grupos que buscan detectar la señal la línea de 21 cm. Se mencionan los mas importantes de una sola antena en la Tabla 1.1 y algunos interferómetros en la Tabla 1.2. En la Fig. 1.8 se muestra un ejemplo de dos proyectos muy diferentes pero con el mismo objetivo. De los proyectos que detectan señal global (una sola antena) podemos encontrar a: EDGES, LEDA, SARAS, BIGHORNS, SCI-HI, MIST, DARE (desde el espacio). De estos proyectos, EDGES (Experiment to Detect the GLobal EoR Signature) ha sido el único en reportar haber medido una señal [14]. Uno de los grandes objetivos de todos estos proyectos es confirmar o refutar lo medido por EDGES [15], mostrado en la Fig. 1.7, ya que existe discrepancia tanto en la forma como en la amplitud de la señal medida con los modelos teóricos de la señal [16] [17], como los mostrados en la Fig. 1.6, donde se puede apreciar que la amplitud de la señal esperada es del orden de los 200 mK, mientras que la amplitud de la señal medida por EDGES es del orden de los 600 mK.

De los proyectos que usan interferometría, tenemos a SKA, HERA, MWA, LOFAR. Se muestra una comparativa de estos proyectos interferométricos en la Tabla 1.2 [18][19][20]. De estos interferómetros, HERA, MWA y LOFAR tienen como uno de sus objetivos, abordar este problema, mientras que SKA se construye como observatorio general, con más de un propósito observacional.

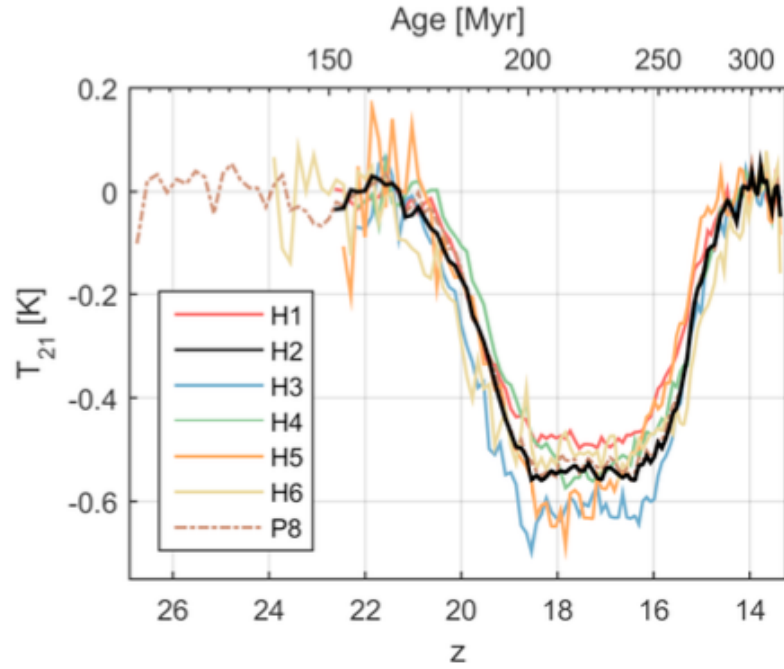
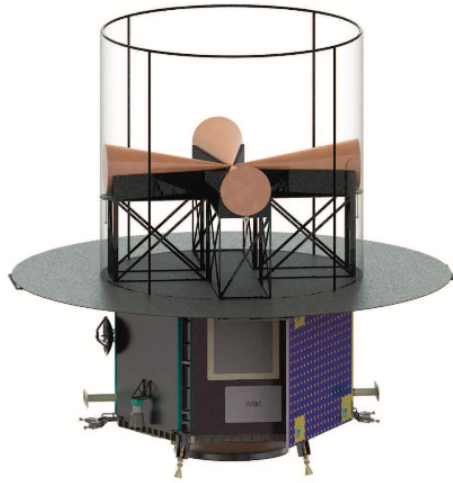


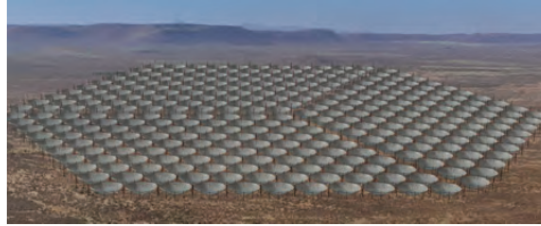
Figura 1.7: Característica de absorción medida por EDGES [14] en el rango de frecuencias de 50-100 MHz correspondiente al rango de redshift $13 < z < 27$. Comparado con los modelos típicos de la señal global, tanto la forma como la amplitud difieren con lo esperado. Extraído de [14].

Experimento	Banda	Localización
SKA	0.1-25 GHz	Australia, Sudáfrica
HERA	50-250 MHz	Sudáfrica
MWA	70-300 MHz	Australia
LOFAR	10-80, 120-240 MHz	Países Bajos

Tabla 1.2: Tabla comparativa de los experimentos trabajando en la detección de la señal de 21 cm. con un interferómetro.



(a) DARE



(b) HERA

Figura 1.8: (a): Representación artística del observatorio DARE. Una estrategia para medir la señal global de 21 cm desde el espacio. La antena consiste en un par de bicónicas cruzadas. (b): Representación artística del observatorio HERA, un interferómetro de 320 elementos destinado a la medición de la línea de 21 cm. Extraído de [20] y [18].

1.3. MIST

La presente tesis se basa en el estudio y los desafíos presentes en la implementación del radiotelescopio MIST (*Mapper of the IGM Spin Temperature*), que es un experimento cosmológico que busca detectar la señal global de 21 cm con alta precisión. En esta sección se discuten las principales características de MIST y su configuración.

1.3.1. Configuración

Dentro de MIST podemos encontrar cuatro subsistemas principales, la antena, cuya discusión se verá en una sección diferente, Front-End, Back-End y Alimentación. Un diagrama de bloques completo del proyecto se puede ver en la Fig. 1.9. Dentro de los subsistemas principales podemos encontrar los siguientes bloques. [10].

Front-End

Dentro del Front-End se pueden encontrar los siguientes bloques

- Red de calibración.
- Cadena de amplificación.
- Placa de control de calibración.

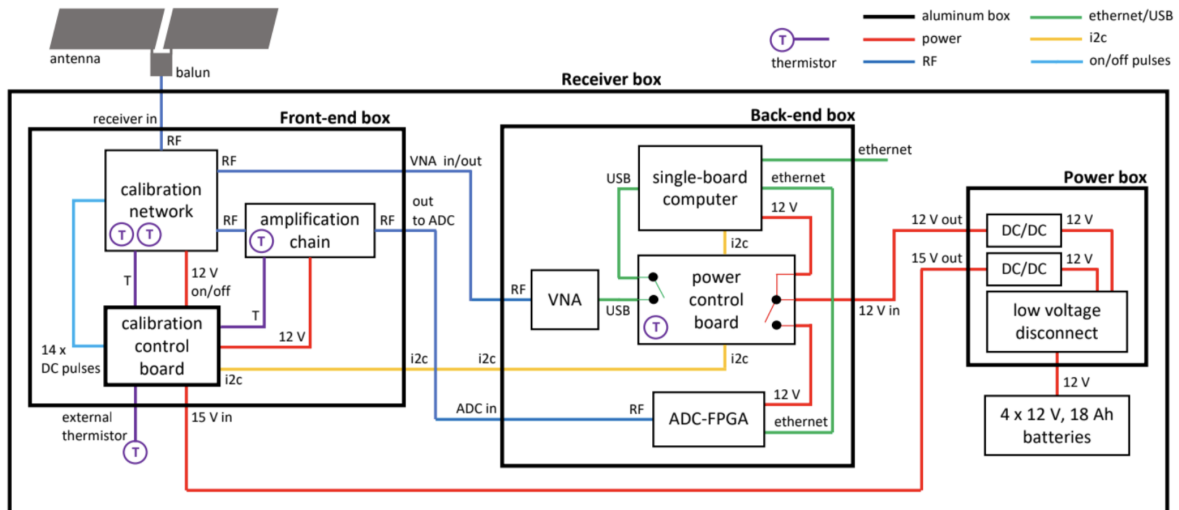


Figura 1.9: Diagrama de bloques en detalle del Front-end y Back-End de MIST, en el Front-End la señal recibida desde la antena es amplificada por el LNA y filtrada, luego en el Back-End es digitalizada en la ADC y procesada en el PC, con ayuda de la GPU. Extraído de [10].

El Front-End recibe, filtra y amplifica la señal desde la antena, además de jugar una parte importante en proceso de calibración del receptor. La red de calibración contiene una carga ambiente y una fuente activa de ruido, adicionalmente, para encaminar la señal según sea necesario la red contiene varios interruptores de radiofrecuencia. Además, la red de calibración permite el uso de cargas abierta, corto y 50Ω (OSL, open, short, load por sus siglas en inglés) para la calibración de las mediciones del coeficiente de reflexión.

La cadena de amplificación comienza con un atenuador de 3 dB seguido de un amplificador de bajo ruido (LNA). Este amplificador fue construido específicamente para MIST para optimizar bajas reflexiones ($|S_{11}|, |S_{22}| < -35$ dB), con una ganancia aproximada de 28 dB y una temperatura de ruido aproximada de 150 K. Un atenuador de 10 dB es conectado a la salida del LNA para regular la ganancia total del receptor además de mejorar las reflexiones con el componente siguiente, un filtro pasa-alto de 48 MHz utilizado para reducir la potencia de las bajas frecuencias. Después del filtro vienen dos amplificadores de 20 dB, un segundo filtro pasa altos de 48 MHz y un filtro pasa bajos de 120 MHz utilizado para eliminar las frecuencias altas. La ganancia total de esta cadena de amplificación es de aproximadamente 55 dB.

La placa de control de calibración es utilizada para controlar los interruptores de radiofrecuencia, mediante pulsos de 12 V con duración de un segundo. Esta placa recibe 15 V desde la caja de alimentación que son regulados y filtrados para lograr 12 V utilizados en la generación de pulsos y alimentar al resto de los componentes del Front-End.

Back-End

Dentro del back-end se pueden encontrar los siguientes bloques

- ADC-FPGA
- VNA
- Placa de alimentación
- Computador monoplaca

La señal RF proveniente de la cadena de amplificación es muestreada por el convertidor Análogo-Digital (ADC) a una tasa de 250×10^6 muestras por segundo con una resolución de 14 bits. Esta señal es además convertida al dominio de frecuencia mediante la FPGA utilizando una transformada rápida de Fourier (FFT). EL VNA (*Vector Network Analyzer*, por sus siglas en inglés) es un instrumento capaz de medir las reflexiones y transmisiones de sistema electromagnético, en función de la frecuencia. Este equipo es utilizado para medir las reflexiones en un rango 1-125 MHz con una resolución de 250 kHz en un tiempo de seis segundos. La placa de alimentación entrega potencia y controla el encendido y apagado tanto de la ADC-FPGA como del VNA. Un computador monoplaca es utilizado para comunicarse con el ADC-FPGA mediante ethernet y con el VNA mediante USB, una conexión de ethernet a un computador externo es necesaria para obtención de los datos, así como para iniciar o parar observaciones.

Alimentación

La alimentación consiste en un banco de cuatro baterías de 12 V, 18 Ah en paralelo, que es suficiente para una operación continua de 48 h. Estas baterías son lo suficientemente pequeñas para ser almacenadas dentro de la caja del receptor, favoreciendo su portabilidad. Durante mediciones de Densidad Espectral de Potencia, el consumo es de 17 W.

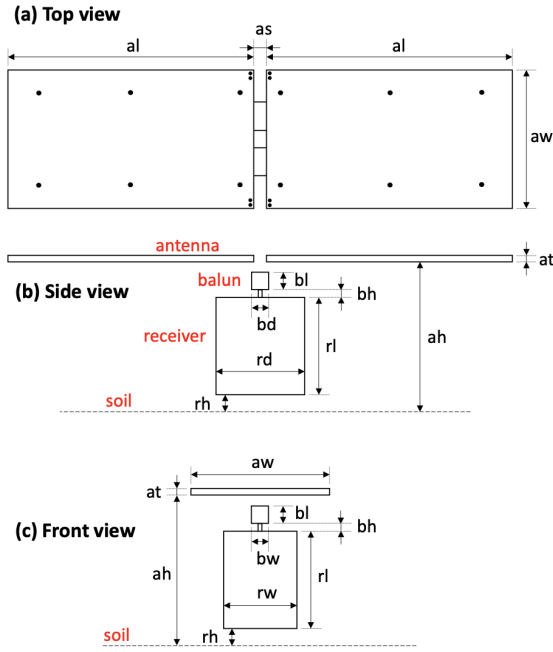
Antena

Las características principales de la antena son:

- Antena plana tipo dipolo, con su plano paralelo al suelo
- Sin plano tierra conductor.
- Estructura conductora de aluminio, estructura de soportes fabricadas en fibra de vidrio.
- Front-End y Back-End localizado bajo la antena
- Balun en el conector principal.

En la Fig. 1.10 se muestra un detalle de la geometría de la antena y receptor de MIST. En esta Figura se puede ver que la antena se encuentra sobre el suelo una altura de 52 cm.

Una de las características más importantes y relevantes para esta tesis es la ausencia de un plano tierra conductor bajo la antena de MIST. Esta decisión se basa en cuatro argumentos. Eliminar la probabilidad de reflexiones indeseadas producidas por una discontinuidad



Dimensión	Parámetro	Valor [m]
Largo panel de antena	al	1.2
Ancho panel de antena	aw	0.6
Espesor panel de antena	at	0.003
Separación paneles	as	0.02
Altura panel de antena	ah	0.52
Largo receptor	rl	0.405
Ancho receptor	rw	0.26
Profundidad receptor	rd	0.335
Altura receptor	rh	0.02
Largo balún	bl	0.05
Ancho Balun	bw	0.03
Profundidad balún	bd	0.037
Altura Balún	bh	0.022

(b) Detalle de las dimensiones de MIST.

(a) Esquema de las dimensiones de MIST.

Figura 1.10: Diagrama y detalle de las dimensiones de la antena, receptor y balún de MIST [10].

eléctrica en los bordes del plano tierra [21] [22] [23], reducir la probabilidad de ganancias instrumentales, diferenciarse sistemáticamente de EDGES y reducir los costos tanto de los materiales de un plano tierra, como de la logística. Esta configuración aumenta las pérdidas en la tierra, pero esta pérdida puede ser estimada mediante simulaciones electromagnéticas, para luego ser sustraídas en el análisis de datos [10]. Esta última observación implica la necesidad de caracterizar el suelo sobre el cual se encuentra la antena, esto es uno de los objetivos principales de esta tesis y se discutirá en la sección 1.3.4. Además en la sección 1.3.3 se discutirá en mayor detalle sobre la elección de estas características.

1.3.2. Posibles localizaciones para el instrumento

Al momento de escritura de esta tesis, entre los posibles sitios de observación de MIST, se ha propuesto el sitio MARI (Medidor Autónomo de Radio Interferencia) que se encuentra en el desierto de Atacama, cuya localización aproximada se muestra en la Fig. 1.11 . Otro sitio para la instalación de MIST es en el ártico canadiense en MARS (McGill Arctic Research Station) presentado en la Fig. 1.12.

1.3.3. Requerimientos de la antena

En esta sección se detalla cada uno de los requerimientos que la antena de MIST debe cumplir para lograr medir la señal de MIST. Es importante recalcar que solo se discutirá de



Figura 1.11: Localización aproximada de MARI, a 135 km de San Pedro de Atacama.



Figura 1.12: Sitios para el proyecto MIST y sus derivaciones, a la izquierda una foto de un posible sitio cercano al cerro armazones, en el desierto de Atacama. A la derecha, el sitio MARS en el ártico Canadiense [24].

Característica	Valor
Ancho de Banda	25-105 MHz
Cromaticidad	1 % [25]
Ancho del Haz	$>30^\circ$
Reflexiones	<-10 dB

Tabla 1.3: Resumen requisitos deseados de la antena de MIST

forma cuantitativa el receptor del telescopio, mientras que el resto de las características y requerimientos de la antena se abordarán de forma cualitativa y sin mucha profundidad. Se detalla un resumen de estos requerimientos en la Tabla 1.3.

Ancho de banda

Para conocer el ancho de banda de la antena, es necesario acotar los límites de tiempo y así conocer el redshift. Si tomamos los límites de la reionización como $6 < z < 30$ según lo visto en la sección 1.1.3 tenemos los límites en frecuencia para $45 < f < 200$ MHz. Esto supone un ancho de banda fraccional cercano al 120 %, lo que es técnicamente muy difícil de conseguir.

Por tanto, la antena de MIST enfocará su diseño exclusivamente entre las frecuencias $25 < f < 105$ MHz, que supone un ancho de banda fraccional cercano al 93 %. Esta es una forma de solucionar el problema del ancho de banda. Otra posible solución es el utilizar dos diferentes antenas escaladas de modo de cubrir completamente todo el rango entre 25 MHz y 105 MHz.

Además, es también necesario incorporar un balun para lograr reflexiones bajo los -10 dB y una eficiente adaptación a la conexión coaxial.

Cromaticidad del haz

La ganancia del telescopio, la forma de su haz y sus lóbulos laterales distantes son dependientes de la frecuencia, debido a su adaptación de impedancia y efectos de borde [13]. Además, como el tamaño del haz depende de la frecuencia, las regiones que contribuyen a la emisión galáctica y extragaláctica son diferentes a diferentes frecuencias [13]. Por tanto, al no poder discriminar entre influencia externa o señal global, se complica considerablemente la medición. Para solucionar este problema existen dos posibles caminos a tomar. Primero, disminuir al máximo posible la cromaticidad del haz de la antena o, segundo, conocer detalladamente la cromaticidad de la antena para aplicarlo a los modelos que serán usados en la medición. En particular, MIST cuantifica la cromaticidad de diferentes formas, una de ellas es calculando la derivada del haz en función de la frecuencia, para cada ángulo de elevación [25].

Ancho del haz

El ancho del haz es también un aspecto importante. La señal que se busca medir, al ser una señal global, se encuentra en todas las direcciones del cielo, por lo que no es necesario un haz muy directivo ni se requiere una resolución específica. Además, la discusión radica en la posibilidad de disminuir la ganancia en altitudes cercanas al horizonte por la posible interferencia electromagnética proveniente de los centros urbanos y las comunicaciones terrestres, así como también el minimizar la influencia extragaláctica por fuentes puntuales.

Un haz ancho de un telescopio pequeño, podría promediar los efectos de muchas fuentes extragalácticas. Esta característica sería considerada una ventaja mientras el número de fuentes pequeñas no domine el espectro. Sin embargo, un telescopio grande con un haz pequeño (por ejemplo, parabólico) haría más fácil observar en áreas sin influencias extragalácticas [13].

Influencia del RFI

La interferencia electromagnética (*Radio Frequency Interference*) en esta banda se debe principalmente a señales de televisión, radio, telecomunicaciones o satélites artificiales. Este es un problema mayor considerando que existen pocas bandas para la investigación espacial [26] y aún así son afectadas por la interferencia. En particular, gran parte de las telecomunicaciones y transmisión comercial (FM y Televisión) se encuentra en la banda de interés para la medición de la señal global, transmitiendo en la banda 87.5-108 MHz. También es posible que la interferencia electromagnética provenga del mismo Front End y Back End, haciendo imprescindible una buena aislación electromagnética de estos componentes [27].

Una de las características de esta interferencia es que proviene principalmente de forma horizontal, por lo que una adecuada elección del haz puede atenuar su potencia. Un arreglo interferométrico tiene la ventaja de poder eventualmente detectar y eliminar esta RFI, ya que tendrá diferente retraso y razón de franjas.

La elección del sitio lejano a cualquier interferencia de radiofrecuencias es primordial para solucionar este problema. El uso de analizadores de espectro que sondeen la interferencia electromagnética en los posibles sitios ayuda a discriminar de mejor forma a la hora de escoger el sitio. Este es el caso del experimento MARI, que logró encontrar exitosamente el sitio.

Límites Fundamentales de sensibilidad

Otro aspecto a considerar es que los modelos teóricos de la señal global estiman que su amplitud máxima se encuentra en el orden de los 0,2 K [5]. En consecuencia es natural cuestionar los límites fundamentales de sensibilidad del instrumento. La mínima variación de intensidad que se puede detectar y el tiempo de integración están relacionados por [13]

$$\Delta T_{min} \sim \frac{T_{sys}}{\sqrt{\delta\nu t}}, \quad (1.7)$$

donde T_{sys} es la temperatura de ruido del sistema calculada como $T_{sys} = T_{ant} + T_{rec}$, $\delta\nu$ es el ancho de banda, y t es el tiempo de integración.

Considerando $T_{sys} = 150$ K (lo mas frío a 150 MHz), un ancho de banda de 5 MHz y un tiempo de integración de 24 h, se puede llegar a $\Delta T_{min} \sim 0,2$ mK [13]. Recordando que la diferencia de temperatura detectable en la señal reionización sería del orden de $\sim 0,2$ K, la sensibilidad no debería ser un problema.

Es importante recordar que cuando se habla de temperatura, significa una potencia medible por el receptor, que es proporcional a la temperatura [28].

Contaminación galáctica y extragaláctica

Este requisito tiene una dificultad que radica en que el fondo galáctico y extragaláctico puede llegar a ser complejo, tanto en frecuencia como en posición. MIST depende de modelos para sustraer la influencia de estas fuentes, y esto sigue siendo un trabajo en curso para la colaboración, fuera del alcance de esta tesis.

Existen zonas en el cielo alejadas del plano galáctico donde es posible realizar la medición, aún así existe influencia de varios factores como, radiación de sincrotrón galáctica, radiación de frenado, fuentes extragalácticas, fondo cósmico de microondas (2,73 K).

1.3.4. Influencia de las características del suelo y plano tierra conductor

En esta sección se discutirá sobre la influencia de las características eléctricas del suelo en la respuesta de la antena.

Influencia del plano tierra

La antena del receptor MIST será montada sobre el suelo según lo discutido en la sección 1.3.3, donde puede o no existir un plano tierra conductor. De cualquier forma, las características ya sean del plano conductor o del mismo terreno, influyen de forma considerable en el comportamiento del haz. Las características eléctricas del terreno influyen considerablemente en las características del haz, como se puede apreciar en la Fig. 1.13.

Aspectos técnicos de un plano tierra conductor

Un plano tierra conductor, ya sea sólido o tipo malla, implica un desafío técnico que no puede obviarse. El plano tierra conductor, debe ser de mayor tamaño que la misma antena, es decir, mayor a los 2 m, si es una o varias placas sólidas compromete considerablemente la movilidad de la antena al aumentar el peso a transportar. De manera similar ocurre si se trata de un plano tierra conductor tipo cable o malla.

Otra razón para descartar un plano tierra conductor, es que se agrega un elemento de diferenciación con el respecto al experimento EDGES. Esta diferenciación es necesaria para descartar cualquier error sistemático en mediciones similares.

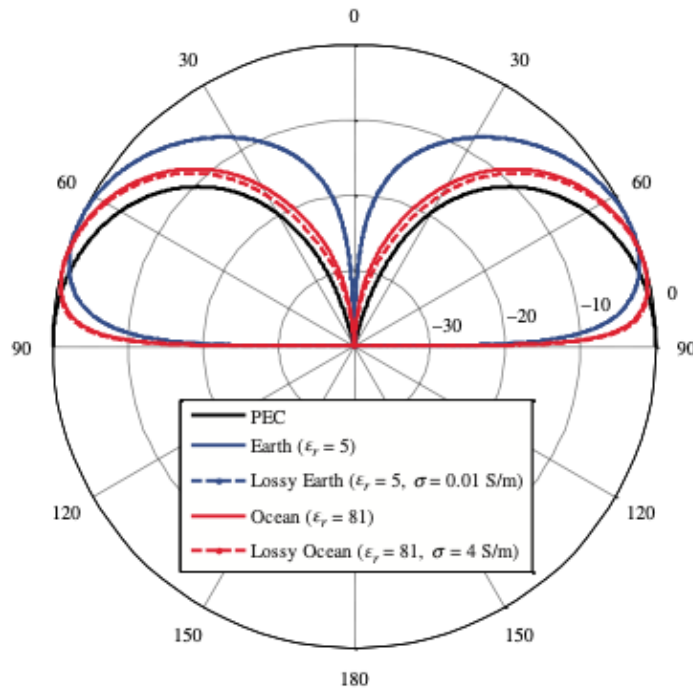


Figura 1.13: Patrón de radiación para una antena dipolo infinitesimal sobre diferentes planos de tierra. Se puede apreciar que tanto las características dieléctricas de la interfaz como la conductividad de esta influye notablemente en el patrón total. Extraído de [28]

Importancia de la caracterización del suelo

Conductividad La conductividad del suelo influye de manera considerable en el patrón de la antena. El suelo al ser un medio dieléctrico con conductividad distinta de cero, dentro del campo cercano de la antena, influye en las reflexiones provenientes de la misma antena, alterando el patrón de radiación y consecuentemente la forma de su haz, ganancia y directividad, como se puede apreciar en la Fig. 1.13.

Sin embargo, como se muestra en la Fig. 1.14, es la ganancia la que se ve afectada de manera considerable al variar los parámetros eléctricos del suelo y como se discutió en la sección 1.3.3, es necesario mantener las dependencias de la forma del haz al mínimo o en su defecto, conocer perfectamente la forma del haz, y para esto es necesario conocer el valor de las características eléctricas del suelo donde se instalará el telescopio.

Una de las maneras más eficientes de medir la conductividad del suelo es el método de Schlumberger y el método de Wenner, que son ampliamente utilizadas en el ámbito de la ingeniería eléctrica y la construcción, donde se mide el potencial y la corriente a través de diferentes electrodos enterrados en el suelo. En el capítulo 2 se explorarán los diferentes métodos utilizados para la medición de conductividad.

Permitividad relativa De la misma forma que con la conductividad, el suelo al ser un medio dieléctrico, influye en las reflexiones de la misma antena afectando sus parámetros,

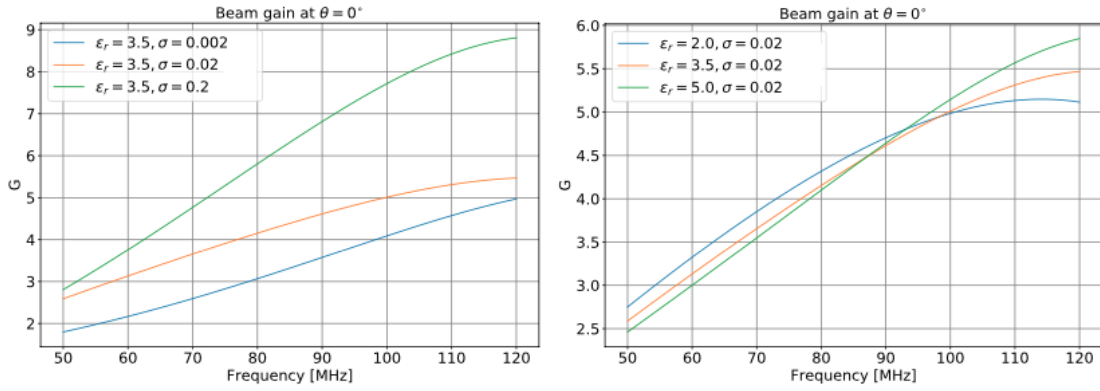


Figura 1.14: Ganancia máxima de la antena en función de la frecuencia para diferentes valores de conductividad y permitividad relativa del suelo. Se puede apreciar que existe gran diferencia al variar estos valores. Créditos a Matheus Pessoa.

Material	Conductivity	Relative permittivity ϵ_r
	S/m	F/m
Air	0	1
Water	$10^{-4} - 10^{-2}$	81
Clay dry	$10^{-3} - 10^{-1}$	2-6
Clay saturated	$10^{-1} - 1$	15-40
Concrete dry	$10^{-3} - 10^{-2}$	4-10
Concrete wet	$10^{-2} - 10^{-1}$	10-20
Sand dry	$10^{-7} - 10^{-3}$	4-6
Sand saturated	$10^{-4} - 10^{-2}$	10-30
Sandy dry soil	$10^{-4} - 10^{-2}$	4-6
Sandy wet soil	$10^{-2} - 10^{-1}$	15-30
Loamy dry soil	$10^{-4} - 10^{-3}$	4-6
Loamy wet soil	$10^{-2} - 10^{-1}$	10-20
Clayey dry soil	$10^{-4} - 10^{-1}$	4-6
Clayey wet soil	$10^{-1} - 1$	10-15

Figura 1.15: Rango típico de los valores de la conductividad y la permitividad relativa de distintos materiales [29]

como la forma del haz, la ganancia y directividad.

Además, como se discutió en la sección 1.3.2, el suelo puede variar desde ser una tundra ártica (MARS) o el desierto de Atacama (MARI), donde la composición química y geológica de esos sitios puede variar considerablemente, y por ende, variar su conductividad y permitividad relativa, como se puede ver en la Fig. 1.15, donde se muestran los valores de conductividad y permitividad relativa para algunos ejemplos de suelo.

Una de las formas para medir la permitividad relativa del suelo es mediante el estudio de las reflexiones de una línea de transmisión dentro de un material a caracterizar. Esta técnica es conocida como reflectometría y puede ser en el dominio de la frecuencia o el tiempo. En el Capítulo 2 se profundizará más sobre los diferentes métodos para determinar la permitividad relativa, además de sus ventajas y desventajas.

1.4. Problema a Abordar

La medición de la señal global de 21-cm. es una muy buena manera de conocer parte importante de la historia del universo, como el amanecer cósmico y la época de reionización, ya que nos proporciona información clave para entender cómo y cuando ocurrió. Una de las ventajas de medir la señal global de 21-cm. es que se puede realizar con un instrumento relativamente simple de implementar. Esta ventaja técnica viene también con la necesidad de conocer y controlar cualquier parámetro que pueda afectar la sensibilidad del instrumento, incluyendo el diseño de la antena. Para el diseño se debe considerar la influencia del suelo sobre el cual se montará la antena, donde influye de manera considerable su conductividad y permitividad relativa. Debido a esta propiedad, es necesario conocer y caracterizar el suelo donde se montará la antena de MIST.

Sin importar la futura localización de MIST, es necesario generar uno o varios métodos capaz de estimar la conductividad y la permitividad relativa, en cualquier tipo de suelo o material en el cual se pueda instalar su antena. En los siguientes capítulos se abordará el problema de encontrar uno o más métodos adecuados para la caracterización de la conductividad y permitividad relativa del suelo y la validación de estos métodos en terrenos donde MIST observe, obteniendo valores concretos para caracterizar el suelo de manera precisa.

1.5. Hipótesis

- *Las características del suelo, afectan el rendimiento y haz de la antena del radiotelescopio MIST.*
- *El método de Schlumberger es adecuado para conocer el perfil de resistividad DC del suelo.*
- *La reflectometría del dominio de tiempo aplicado a líneas de transmisión, es un método adecuado para medir la permitividad relativa del suelo*

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Como objetivo general, se ha definido:

- Caracterizar conductividad eléctrica y permitividad relativa del suelo, en el rango 50-120 MHz para ser aplicado en el radio telescopio MIST.

1.6.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, para lograr el objetivo general, se han definido:

- Diseñar un método para conocer la conductividad DC y perfil vertical de conductividad del suelo
- Determinar conductividad y perfil vertical de conductividad, utilizando método de Schlumberger.
- Construir sensor de permitividad relativa capaz de medirla en el rango 50-120 MHz.
- Determinar permitividad relativa del suelo en el rango 50-120 MHz, utilizando la técnica de líneas de transmisión.
- Conocer la conductividad y permitividad relativa en un sitio de prueba definido.

1.7. Resultados esperados

En el desarrollo de esta tesis, utilizando métodos conocidos y estudiados, se espera caracterizar eléctricamente el suelo donde se instale el radiotelescopio MIST

Se espera converger a un método optimizado para estudiar la permitividad relativa y conductividad del suelo, ya que estos métodos se concentran en el estudio de materiales aislados en laboratorio.

En particular se espera:

- Conocer la conductividad y la estructura de capas de un suelo de pruebas cualquiera.
- Conocer la permitividad relativa del suelo de un suelo de pruebas cualquiera.

1.8. Estructura de esta Tesis

- **Estado del Arte:** En el Capítulo 2 se discuten los diferentes métodos existentes para medir la conductividad y la permitividad de diferentes materiales, analizando sus ventajas y desventajas al aplicarlos al problema de esta tesis.
- **Metodología:** En el Capítulo 3 se detalla la método a seguir para medir la conductividad y permitividad, el análisis de los datos y la elección de los sitios a medir.
- **Resultados, discusión y análisis:** En el Capítulo 4 se muestran los resultados de los terrenos medidos, además de la discusión y el análisis de cada terreno y sus particularidades.
- **Conclusiones y trabajo futuro:** En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo realizado y posibles mejoras y ajustes al método utilizado.

Capítulo 2

Estado del Arte

La medición de las características eléctricas de algún material tiene aplicaciones mucho más allá de las que motivan esta tesis. Es principalmente la industria quien ha desarrollado diferentes técnicas y métodos para determinar las variables eléctricas, o es al menos la industria quien motiva el desarrollo científico en esta dirección. La caracterización eléctrica de materiales es utilizada tanto en la industria electrónica como en industria energética y en incluso en industrias como la nanotecnología y la biomédica. Además, existe un subgrupo, que se enfoca en medir las variables eléctricas del suelo, cuyo (conocimiento) es muy necesario y útil en varios sectores industriales, que van desde la agricultura, la construcción, minería y geotécnica.

El desarrollo de estos métodos y técnicas ha llevado a la creación de diferentes instrumentos con tecnología dedicada a la medición de estos parámetros eléctricos. Existen instrumentos creados específicamente para medir la conductividad eléctrica y otros para medir la permitividad relativa, donde destacan el telurímetro y el analizador dieléctrico, respectivamente.

En este capítulo se revisan los diferentes métodos y técnicas utilizadas para medir la permitividad eléctrica, sea compleja o no, y la conductividad DC de algún material de prueba. También se discutirán las diferentes ventajas y desventajas de cada uno, comparándolos para determinar el más apropiado a utilizar en el desarrollo de esta tesis. El criterio a utilizar no será siempre la precisión del método sino también su adecuación a las mediciones del suelo en el terreno que MIST requiera y también los recursos disponibles dentro de esta investigación.

2.1. Métodos para obtener la conductividad DC

En esta sección se discuten los principales métodos para obtener la resistividad DC del suelo. Estos métodos consisten fundamentalmente en la medición de corriente y voltaje de electrodos enterrados, con una disposición geométrica específica.

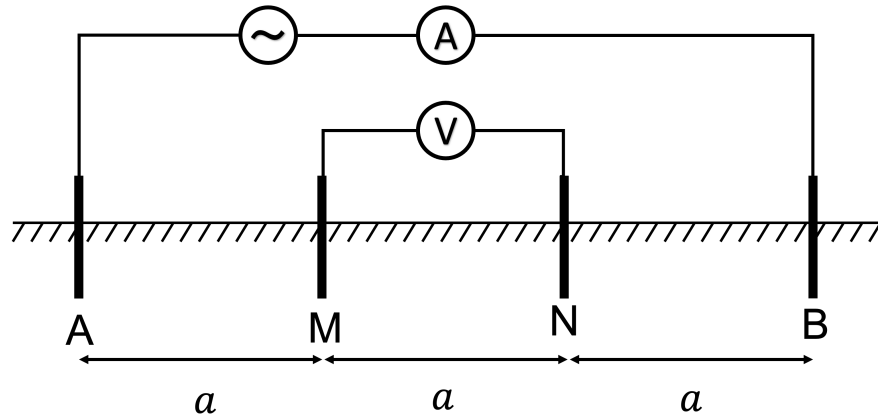


Figura 2.1: Método de Wenner de cuatro electrodos utilizado ampliamente para obtener la resistividad aparente del suelo. Mediante este método es posible calcular una resistencia aparente V/I , utilizada para obtener la resistividad [31].

2.1.1. Método de Wenner

El método de Wenner consiste en la colocación de cuatro electrodos conductores equiespaciados por una distancia a en línea recta, como se puede ver en la Fig. 2.1 [30]. Se conecta un voltaje conocido entre los electrodos exteriores, mediante un voltímetro se mide el voltaje entre los electrodos interiores y con un amperímetro se mide la corriente que circula por los electrodos exteriores. Esto es para asegurarse de que la corriente fluya entre los electrodos exteriores y generar así una diferencia de potencial medible en los electrodos interiores. Este voltaje medido V y corriente I es utilizado para calcular una resistencia aparente R . Si el suelo tiene resistividad homogénea, su valor es¹

$$\rho_W = 2\pi a R. \quad (2.1)$$

Generalmente, la corriente fluirá en un arco entre los electrodos exteriores, y por lo tanto, la profundidad a la cual fluirá esta corriente será mayor mientras mayor sea la separación a entre los electrodos. En general, mas de la mitad de la corriente circula a una profundidad igual o mayor a $AB/2$ [31].

Este método asume la homogeneidad de la resistividad del suelo que usualmente, no es el caso. Por lo tanto es necesario obtener información adicional de la resistividad del suelo. Esta información es posible obtenerla al variar la distancia a y crear una curva de resistividades aparentes en función de esta distancia. La interpretación de estos datos se verá mas adelante en esta misma sección.

¹La demostración de esta fórmula se escapa a los alcances de esta tesis, puede encontrarse en el Anexo.

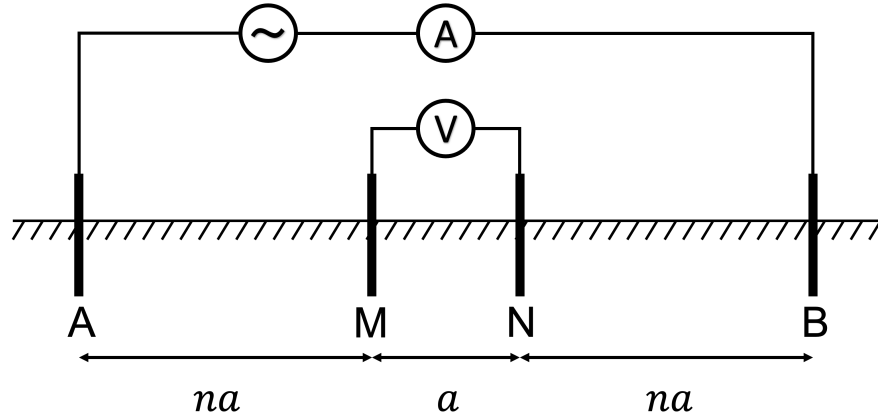


Figura 2.2: Método de Schlumberger de cuatro electrodos, utilizado ampliamente para obtener la resistividad aparente del suelo. Mediante este método es posible calcular una resistencia aparente V/I , utilizada para obtener la resistividad. [31]

2.1.2. Método de Schlumberger

El método de Schlumberger [31], es similar al método de Wenner con la diferencia que los electrodos interiores están separados una distancia a mientras que la distancia entre los electrodos interiores y los exteriores es na , con n cualquier número, idealmente entero. Similarmenete al método anterior, se mide el voltaje en los electrodos interiores V y la corriente por los electrodos exteriores I , para obtener una resistencia aparente $R = V/I$, esta configuración se muestra en la Fig. 2.2.

De igual manera, se mide el voltaje si la resistividad ρ es homogénea, que tiene un valor²

$$\rho_S = \pi n(n + 1)aR. \quad (2.2)$$

Esta vez, la distancia a es fija y para obtener mayor información sobre la estructura de resistividades del suelo es necesario variar el parámetro n y así obtener una curva de la resistividad en función de este parámetro.

Al igual que en el método del Wenner, la corriente fluirá a través de los electrodos exteriores, aumentando la profundidad de penetración a medida que es mayor la distancia entre estos, con mas de la mitad de la corriente circulando a una profundidad mayor a una distancia $AB/2$.

Este método es el que se utilizará en el desarrollo de esta tesis debido a que se ha comprobado que tiene una mejor resolución a la hora de detectar capas de diferente conductividad en el subsuelo [32]. Además, este método es mas práctico y rápido de medir ya que dos electrodos se encuentran estáticos y no necesitan variar su posición para obtener información de la estructura de capas bajo el suelo.

²De igual manera que para el método de Wenner, la demostración de esta fórmula escapa a los alcances de esta tesis, se incluye en el Anexo.

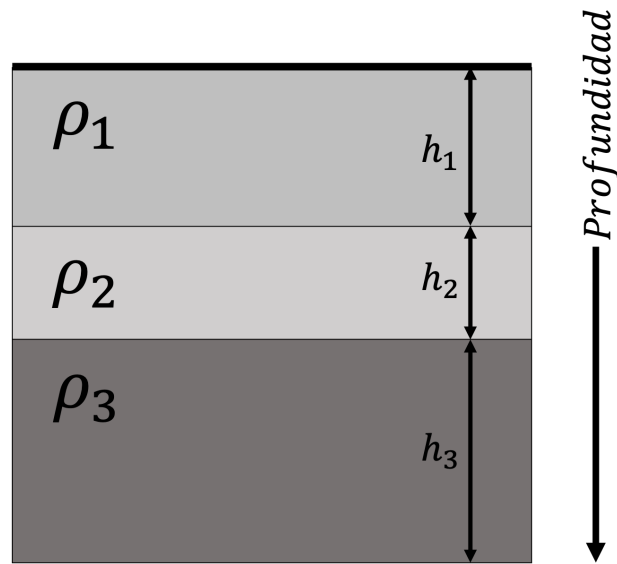


Figura 2.3: Modelo ideal de capas horizontales de diferente conductividad. El sondeo eléctrico vertical ayuda a estimar las resistividades, así como también el espesor y número de capas.

2.1.3. Sondeo Eléctrico Vertical

El sondeo eléctrico vertical, es una técnica geofísica usada para estimar las resistividades (inverso de la conductividad) de las capas horizontales bajo la superficie, esta técnica es utilizada frecuentemente en minería, ingeniería civil y manejo de recursos acuíferos. Esta técnica es complementario a los métodos de Wenner y Schlumberger. Provee información tal como el número de capas, el espesor y las resistividades eléctricas usando un instrumento simple llamado telurímetro. En la Fig. 2.3 se muestra un modelo ideal de suelo con capas horizontales de distinta resistividad y espesor.

Interpretación de los datos

Dado que los datos medidos a partir de la resistividad aparente, al variar la distancia de los electrodos, no entrega información directa de la estructura de capas del suelo, estos datos necesitan ser interpretados. Para lograr esto, ya sea con datos medidos con el método de Wenner o de Schlumberger, implica determinar la estructura del suelo y sus propiedades mediante un modelo matemático. Las variables a determinar en este caso corresponden a los espesores y resistividades de cada capa. Este problema es conocido en geofísica como "problema inverso". Con respecto a obtener el modelo matemático idealizado corresponde a la predicción teórica a una medición del suelo. Este problema es conocido en geofísica como "problema directo".

El problema directo tiene solución única, es decir, para cierta estructura de capas existe una única curva de resistividad aparente medida. Sin embargo, no es un problema sencillo de resolver aún cuando sus cálculos fueron derivados por Stefanescu y Schlumberger [33]. El desafío se presenta como la resolución de una integral sin una solución inmediata, requiriendo

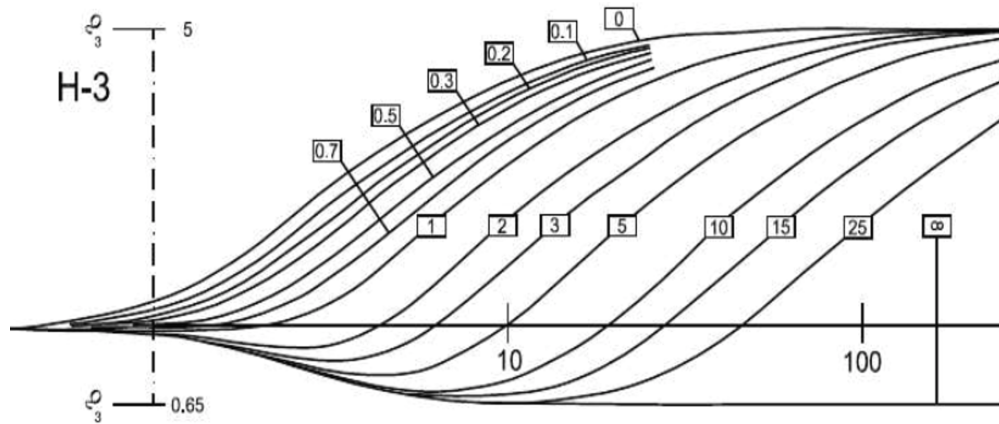


Figura 2.4: Ejemplo de curvas patrón para una estructura de tres capas. Extraído de [34].

un método que implica el desarrollo de una serie con una tasa de convergencia extremadamente lenta para su implementación práctica. Una de las formas de interpretar estos datos sin tener una gran capacidad de computación, es comparar las curvas de resistividad medidas con un repertorio de curvas ya resueltas llamadas curvas patrón [34]. Un ejemplo de las curvas patrón se muestra en le Fig. 2.4.

Con el avance de la teoría de filtros lineales aplicados a sondeos de restividad [35]y [36] combinado a la aplicación de computadores resolver este problema [37] y [38], es posible obtener una solución relativamente sencilla y rápida a la integral de Stefanescu y Schlumberger. En la actualidad existen diversos software disponibles para la interpretación de datos de Sondeo Eléctrico Vertical, como lo es *IPI2Win*, *ZondIP1D*, *AGI EarthImager* o *MARAI-1D*. Debido a su buen desempeño en comparación con otros softwares disponibles y práctica interefaz de usuario [39], en el desarrollo de esta tesis se utilizará *IPI2Win*.

2.2. Métodos para obtener la permitividad relativa

En esta sección se discuten las diferentes técnicas que existen para medir la permitividad dieléctrica en algún material. Cabe mencionar que se tratará de técnicas en general, no necesariamente con aplicaciones prácticas en suelo.

Espacio Libre

Este método consiste en la colocación de la muestra entre dos antenas, para medir la transmisión entre ellas con y sin la muestra y de esta forma conocer las características dieléctricas del material [40]. Para este método es necesario utilizar un VNA, además de la construcción y caracterización de las antenas, lo que lo hace técnicamente un poco más complicado [41]. Un esquema de la configuración para realizar este método se encuentra en la Fig. 2.5.

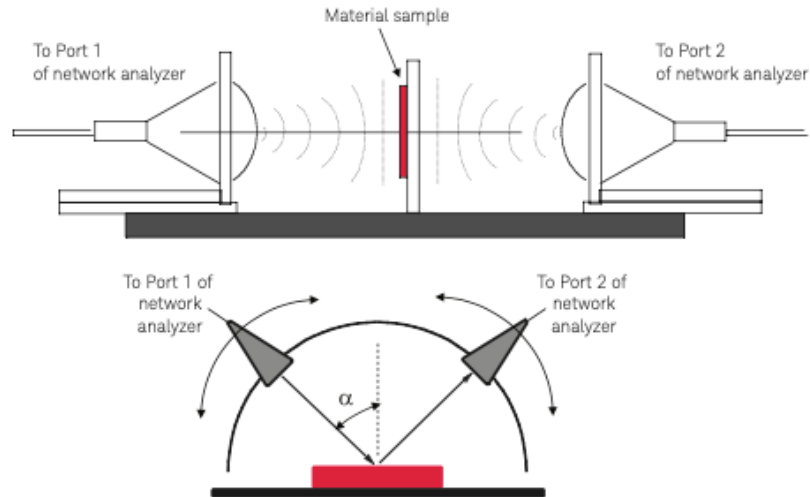


Figura 2.5: Configuraciones utilizadas para medir las características dieléctricas de los materiales utilizando el método de espacio libre [40]. (Arriba) En esta configuración se aprovecha la transmisión de la onda por el material. (Abajo) En esta segunda configuración se aprovecha la reflectividad del material a examinar. Extraído de [40].

Método de Nicolson-Ross-Weir Un método con un principio similar al de espacio libre es el método de Nicolson-Ross-Weir [42], que en lugar de colocar la muestra entre dos antenas, ésta se introduce al interior de una guía de onda. Esta guía de onda puede ser tanto rectangular como coaxial. Luego se mide las reflexiones y transmisiones mediante un VNA.

Cavidad resonante

En este método, la muestra del material a medir se introduce en una cavidad, lo que afecta la frecuencia de resonancia y el factor de calidad Q del resonador. Se puede apreciar una configuración de este tipo en la Fig. 2.6. Con estos parámetros es posible calcular la permitividad compleja del material en una sola frecuencia. Típicamente es necesario un VNA, alguna configuración resonante y software para los cálculos [40].

Placas paralelas

El método de placas paralelas supone introducir la muestra entre dos placas paralelas conductoras para formar un condensador. Se utiliza cualquier instrumento capaz de medir la impedancia $Z = (j\omega C + G)^{-1}$ de la configuración, que lo hace más simple de medir. Los parámetros C y G corresponden a la capacitancia y conductancia del condensador y dependen directamente de la permitividad compleja de la muestra, además de la geometría de la configuración, un ejemplo de esta configuración puede verse en la Fig. 2.7.

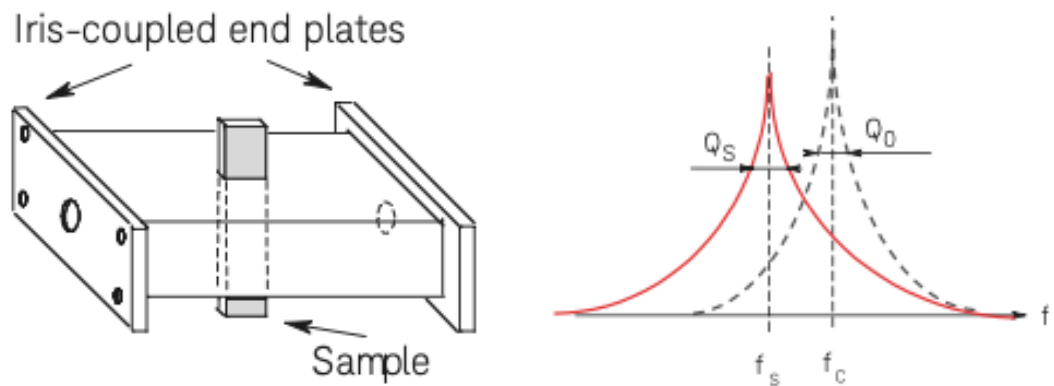


Figura 2.6: Configuración de una cavidad resonante para medir la permitividad compleja, donde se mide el cambio de la frecuencia de resonancia f_c y del factor de calidad Q_0 del resonador. Con estos parámetros es posible determinar la permitividad compleja de una muestra. Extraído de [40].

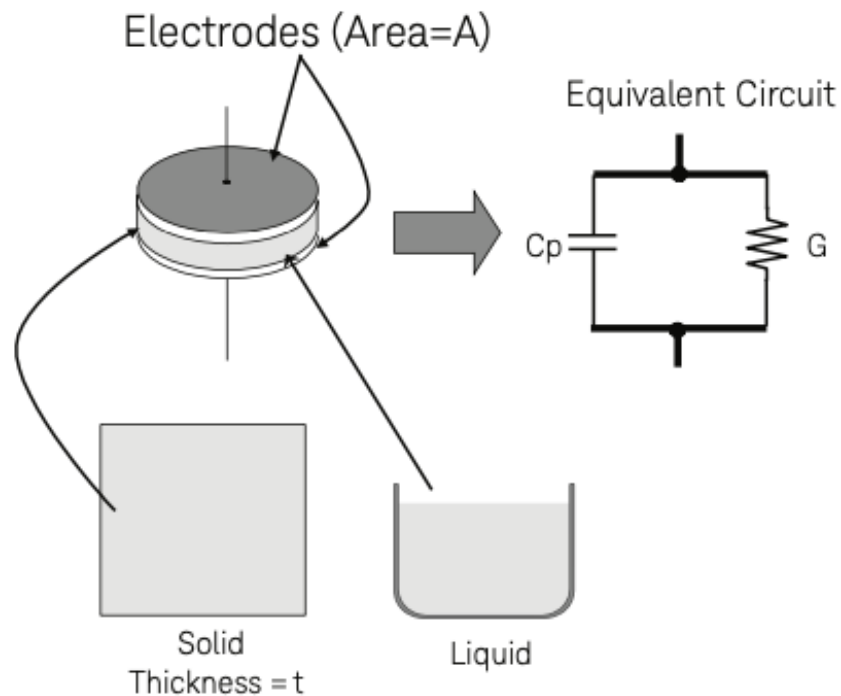


Figura 2.7: Método de placas paralelas para medir la permitividad compleja de una muestra. Se mide su admitancia Y en función de la capacitancia y conductancia de la muestra, parámetros con los cuales se puede obtener la permitividad compleja. Extraído de [40].

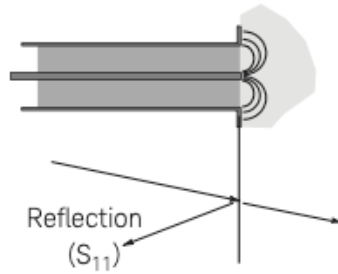


Figura 2.8: Sonda coaxial utilizada para estudiar la permitividad compleja del material a estudiar. Extraído de [40].

Líneas de Transmisión

Este método consiste en introducir la línea de transmisión (usualmente una línea bifilar, aunque puede ser coaxial, una guía de onda o incluso una microstrip) en el material de muestra, para luego medir las características de la línea, como su impedancia característica, transmisiones, reflexiones, o incluso medir su comportamiento en el dominio del tiempo. Todas estas características dependen directa o indirectamente de la permitividad del material bajo prueba. La configuración utilizada con este método puede variar según el tipo de línea de transmisión a utilizar. Sin embargo el principio básico es el mismo, medir las características de propagación de la línea.

Sonda coaxial

Este método consiste en una sonda coaxial con un extremo abierto, para entrar en contacto con la muestra. Se mide y analiza el coeficiente de reflexión, para estimar la permitividad compleja de la muestra (Fig. 2.8). Para esto es necesario utilizar un VNA, y medir en el rango de frecuencias deseado. Una ventaja de este método es que no es invasivo y funciona en un gran rango de frecuencias, quedando limitado sólo por la capacidad del VNA y le geometría del cable o sonda coaxial a utilizar [40].


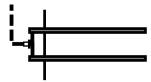

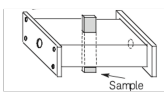
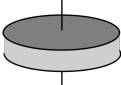
Este método podría considerarse un subgrupo del método de líneas de transmisión, sin embargo este método no es invasivo ya que no considera introducir la línea de transmisión dentro de la muestra. Además este método puede ejecutarse no sólo con una línea coaxial, sino que también con una guía de ondas, dependiendo de su geometría y frecuencia.

Un resumen de estas técnicas se encuentra en la Fig. 2.9 y en la Tabla 2.1 se comparan los diferentes métodos.

2.2.1. Comparación de los diferentes métodos

En esta sección se discuten los métodos introducidos en la sección anterior. Se puede apreciar un resumen en la Tabla 2.1. Los criterios utilizados tienen relación con la factibilidad

Resumen de las Técnicas

Sonda Coaxial	ϵ_r		Gran ancho de banda, conveniente, no destructivo. Mejor para medios con altas pérdidas; líquidos o semi-sólidos
Línea de Transmisión	ϵ_r y μ_r		Gran ancho de banda. Mejor para medios con altas y bajas pérdidas.
Espacio Libre	ϵ_r y μ_r		No hay contacto con la muestra Mejor para altas temperaturas, muestras grandes o planas.
Cavidad Resonante	ϵ_r y μ_r		Preciso Mejor para medios con bajas pérdidas, pequeñas o delgadas.
Placas Paralelas	ϵ_r		Mejor para bajas frecuencias. Muestras pequeñas o planas

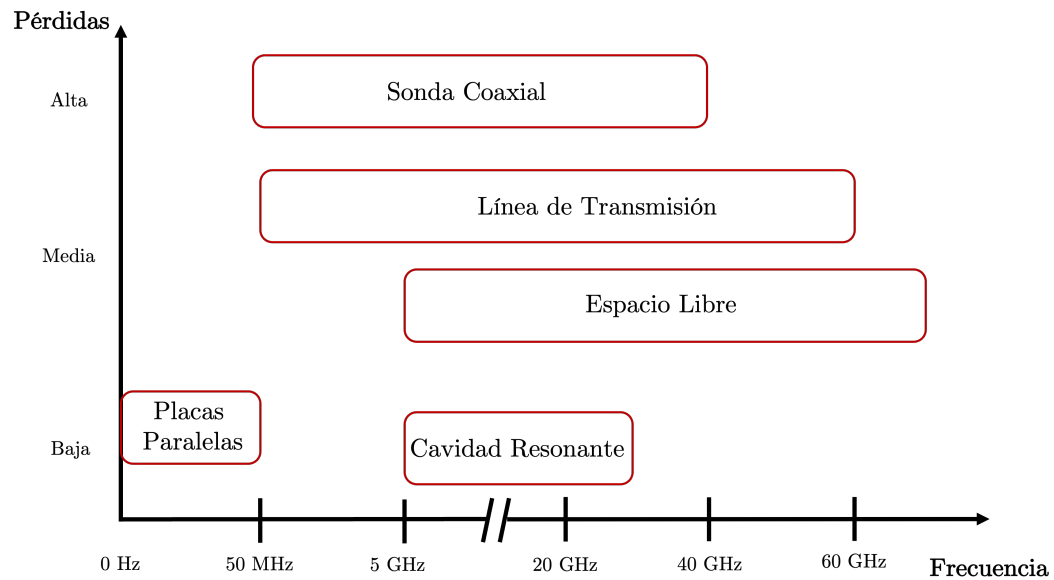


Figura 2.9: Usualmente la técnica a elegir depende de factores como, la frecuencia de interés, el valor esperado de ρ , la precisión requerida, las propiedades del material, el estado en que se encuentre el material (líquido, polvo, sólido, placas), restricciones del material, destructivo o no destructivo, de contacto o sin contacto. Adaptado de [41].

Método \ Criterio	Rango de Frecuencias	Sólidos	Líquido	Apto para suelo
Líneas de Transmisión	0.05-60 GHz	✓	✓	✓
Sonda Coaxial	50-40 GHz	✓	✓	✓
Espacio Libre	5-100 GHz	✓	✓	✗
Cavidad Resonante	5-30 GHz	✓	✓	✗
Placas Paralelas	0-50 MHz	✓	✓	✗

Tabla 2.1: Tabla comparativa de los diferentes métodos para medir la permitividad dieléctrica de un material

de poder medir o no en suelo sin ser demasiado invasivos, y si es posible medir en RF o en DC.

Primero se deben descartar aquellos métodos que no sean prácticos aplicarlos a mediciones de suelo, ya que por el solo hecho de tomar una muestra del suelo puede alterar las características deseadas a medir, como puede ser la alteración de la compactación, humedad u homogeneidad. Dicho esto, los dos posibles métodos aplicables a las mediciones del suelo son las mediciones con líneas de transmisión y con sonda coaxial.

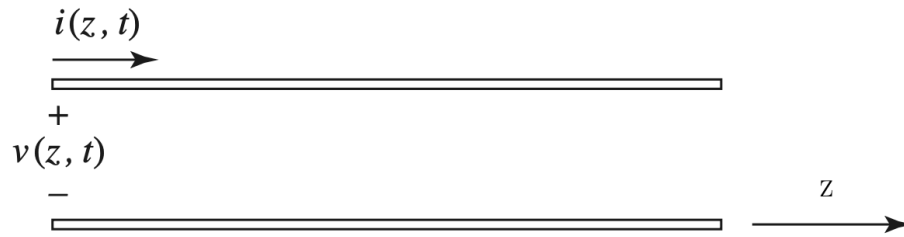
Ambos métodos utilizan de alguna u otra manera ondas electromagnéticas para determinar las características del suelo. El método de sonda coaxial inyecta ondas en el suelo, mientras que la línea de transmisión dirige las ondas electromagnéticas dentro del suelo. Además, se debe considerar la naturaleza del suelo a analizar, donde se pueden tener suelos muy homogéneos, como la arena o arcilla, y también se pueden tener suelos más heterogéneos o pedregosos. Dicho esto, es natural pensar que mientras mayor el área por donde se propaguen las ondas electromagnéticas, mayor información se tendrá del suelo medido y descartando así una medición demasiado localizada.

Aunque es posible lograr áreas mayores de transmisión con ámbos métodos bajo prueba, la construcción de éstas se simplifica bastante en el método de líneas de transmisión, donde se puede conseguir una línea bifilar de una forma bastante sencilla, mientras que lograr una línea de transmisión coaxial con una gran área de transmisión es técnicamente más complicado. Por lo tanto, para el desarrollo de esta tesis se trabajará con el método de líneas de transmisión para la determinación de la permitividad compleja, particularmente con la línea bifilar.

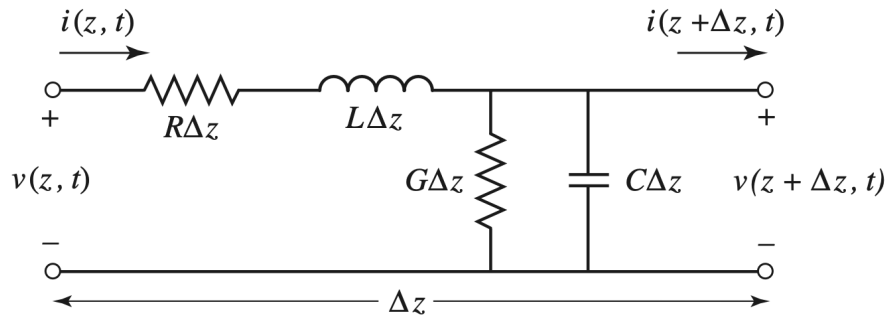
2.3. Mediciones del suelo con líneas de transmisión

La medición de las características dieléctricas con este método se basa en la teoría de líneas de transmisión, donde tanto la impedancia característica y la constante de propagación dependen directamente de los parámetros eléctricos del medio en el cual se encuentra la línea, como lo puede ser la conductividad y la permitividad del medio.

Uno de los modelos más utilizados [43] para representar la transmisión de ondas electromagnéticas en una línea de transmisión, es el modelo de línea bifilar, que se muestra en la



(a) Modelo de línea bifilar



(b) Modelo de elementos concentrados

Figura 2.10: Modelo utilizado en teoría de líneas de transmisión, (a) Es el modelo bifilar, ya que todas las líneas de transmisión tienen al menos dos conductores. (b) Es el modelo circuital de elementos concentrados. Extraído de [43].

Fig. 2.10a, ya que todas las líneas de transmisión tienen al menos dos conductores. Esta sección de largo infinitesimal Δz puede ser modelado como un circuito equivalente de elementos concentrados como el de la Fig. 2.10b.

Un circuito equivalente de elementos concentrados es un modelo simplificado de una línea de transmisión que representa su comportamiento eléctrico utilizando elementos concentrados o discretos, como pueden ser, resistencias, condensadores o inductores. El circuito equivalente se basa en el concepto de dividir la línea de transmisión en segmentos infinitesimales de largo Δz , donde cada segmento puede ser representado por un circuito de elementos concentrados, R , L , G y C que son cantidades por unidad de largo, donde:

- R = Resistencia en serie por unidad de largo, para ambos conductores, en Ω/m .
- L = Inductancia en serie por unidad de largo, para ambos conductores, en H/m .
- G = Conductancia en paralelo por unidaad de largo, en S/m .
- C = Capacitancia en paralelo por unidad de largo, en F/m .

La resistencia R representa las pérdidas en el conductor debido a su conductividad finita. La inductancia L representa la auto-inductancia de ambos conductores. C representa la capacitancia existente por la proximidad de ambos conductores. Finalmente la conductancia G representa las pérdidas en el material debido a una conductividad diferente de cero.

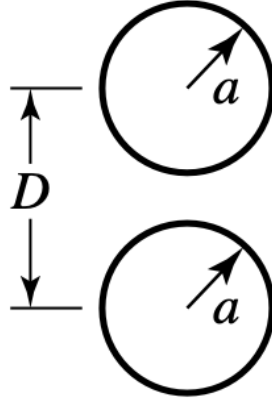


Figura 2.11: Esquema de una línea de transmisión bifilar, donde a representa el radio de cada conductor, y D la separación entre estos.

Este modelo de elementos concentrados es muy útil a la hora de analizar y diseñar líneas de transmisión, pues se puede predecir y estudiar su comportamiento bajo diferentes condiciones. Una de las formas en las que se relaciona este modelo con las características de la línea de transmisión, es calculando su impedancia característica Z_0 y su constante de propagación γ , donde

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (2.3)$$

y

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \quad (2.4)$$

Estos parámetros dependen directamente de la permitividad del medio y conductividad y de la geometría de la línea de transmisión. En particular para la línea bifilar como la de la Fig. 2.11 se tiene que estos parámetros se calculan de la forma

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right) \quad (2.5)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon'}{\cosh^{-1}(D/2a)} \quad (2.6)$$

$$R = \frac{R_s}{\pi a} \quad (2.7)$$

$$G = \frac{\pi \omega \epsilon''}{\cosh^{-1}(D/2a)} \quad (2.8)$$

donde $R_s = 1/\sigma\delta_s$ es la resistencia superficial de los conductores.

Experimentalmente el método requiere introducir una línea de transmisión en un material a caracterizar (o introducir el material en una línea de transmisión), así la permitividad compleja puede ser calculada al encontrar un ajuste de las variables con las mediciones en terreno [40]. El cálculo de los parámetros se obtiene principalmente de las reflexiones y la impedancia de entrada, en función de la frecuencia, medida desde un VNA. También se pueden medir parámetros como la velocidad de propagación o el tiempo de respuesta de un pulso electromagnético. Sin embargo, estas mediciones en el dominio del tiempo implican el uso de pulsos electromagnéticos que suelen tener un ancho de banda mayor [44], incompatible con las necesidades de MIST [10].

Otra forma de validar los resultados medidos con los teóricos es mediante la simulación electromagnética del montaje experimental. Es posible recrear el experimento en software de simulación como *HFSS* o *FEKO*, de esta manera se puede validar e incluso optimizar los resultados obtenidos. Una ventaja de validar los resultados con software de simulación es la posibilidad de crear modelos más complejos que se asemejen al montaje real, como por ejemplo, el bosquejo de los conectores mismos o asignarle geometrías más complejas a la línea de transmisión. Este método se discutirá en mayor profundidad en el siguiente capítulo.

2.3.1. Reflectometría como método para determinar la permitividad

La reflectometría es una técnica basada en la medición de las reflexiones de una onda. Se pueden obtener las características eléctricas estudiando el comportamiento de las reflexiones, tanto en el dominio de la frecuencia, como en el dominio del tiempo. En el dominio de la frecuencia se estudia la respuesta, tanto la reflexión o transmisión, al aplicar un barrido de frecuencia dentro de un rango deseado, el rango a utilizar puede depender tanto de la aplicación a utilizar como de las dimensiones de la línea de transmisión (sonda) a utilizar. Para esto se puede medir la impedancia de entrada $Z_{in}(\omega)$, o los parámetros de la matriz de dispersión $S_{ij}(\omega)$.

Para obtener los resultados pueden utilizarse dos formas, una es comparar las mediciones con la solución analítica si lo existe (línea coaxial, guía de onda, línea bifilar o placas paralelas) [45] y buscar la curva analítica que minimice la diferencia entre ambas curvas. Otra técnica para obtener resultados es realizar simulaciones en software de análisis electromagnético (FEKO, HFSS) y en conjunto a algún método de optimización obtener la simulación que minimice la diferencia con la medición [46]. Un ejemplo de la segunda técnica se puede ver en la Fig. 2.12, donde a medida que aumentan las iteraciones, se va convergiendo a una curva que minimice la diferencia con la medición en terreno.

También es posible estudiar las reflexiones de una onda en el dominio del tiempo, método que consiste en enviar pulsos a lo largo de una línea de transmisión para estudiar la onda reflejada [48]. Este método entrega información del tiempo de retardo de la señal, con lo cual es posible calcular la distancia a la muestra o la localización de alguna falla en la línea de transmisión [44]. Conociendo los tiempos de retardo y la forma de la señal reflejada, es posible conocer los parámetros del medio en que se encuentra la línea de transmisión (Fig. 2.13). Al ser pulsos en el dominio del tiempo, estos pueden significar un amplio ancho de banda en el

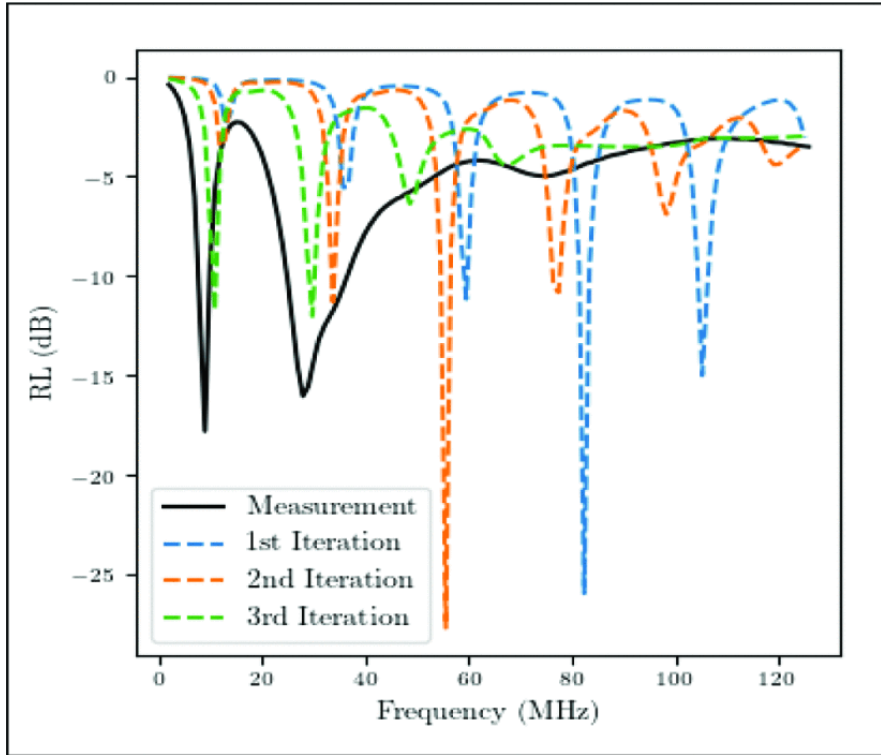


Figura 2.12: Coeficiente de reflexión de la sonda de línea de transmisión para medir la permitividad usando la técnica de reflectometría de dominio de frecuencia (línea continua) , las diferentes iteraciones de las simulaciones buscan converger al coeficiente de reflexión medido para estimar los parámetros del suelo. Extraído de [46].

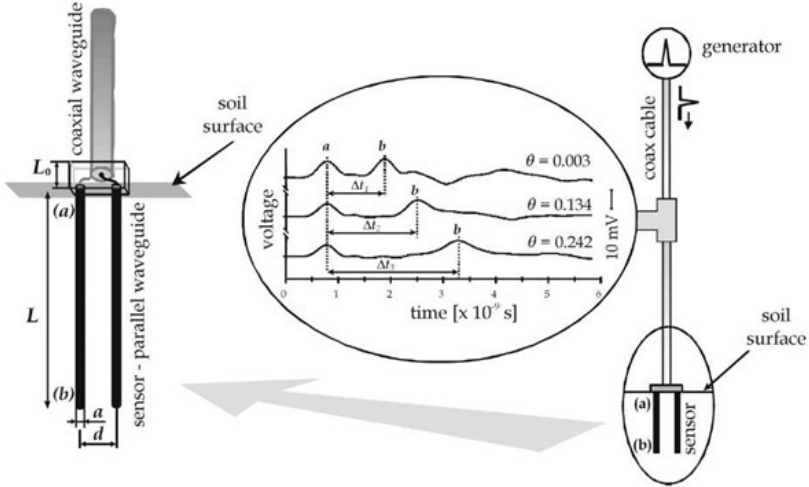


Figura 2.13: Configuración para mediciones de las características dieléctricas, usando la técnica de reflectometría de dominio de tiempo (TDR). La técnica consiste en medir el retardo en el tiempo de un pulso entregado a una línea de transmisión, este retardo es utilizado para obtener los parámetros de la línea y así la permitividad compleja. El mismo equipamiento puede ser utilizado para medir con la técnica de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR). Extraído de [47].

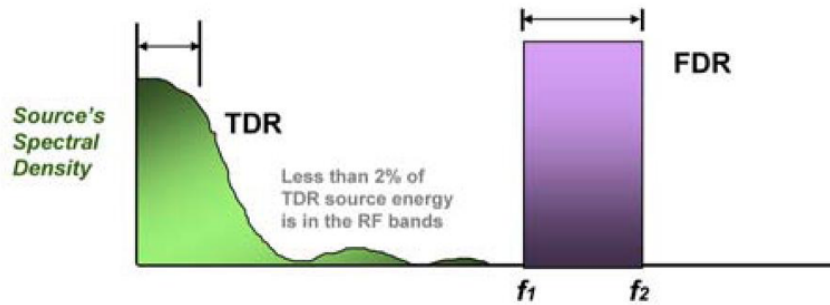


Figura 2.14: Ancho de banda de los diferentes métodos a utilizar. El método de TDR al enviar pulsos en el tiempo, puede ocupar un gran ancho de banda quizás no deseado. Extraído de [44].

dominio de la frecuencia, siendo un aspecto a considerar si la frecuencia es importante para la medición. Un ejemplo de configuración de este método se encuentra en la Fig. 2.14.

Comparación entre FDR y TDR

En el desarrollo de esta tesis, se escogió la utilización del método de FDR por sobre el TDR, por su facilidad de uso en conjunto con instrumentos de análisis de redes de microondas (VNA) y las simulaciones electromagnéticas (HFSS) que generalmente trabajan en el dominio de la frecuencia. Además, como se aprecia en la Fig. 2.14, al utilizar la reflectometría en el dominio de la frecuencia se tiene bien definido el rango de frecuencias usado. Este último es de relevancia para el proyecto MIST ya que se está trabajando en un ancho de banda bien definido de 25-105 MHz.

2.4. Resumen

En este capítulo se detallaron los métodos tradicionales y emergentes para la determinación de la conductividad y la permitividad relativa. Los métodos más tradicionales en la medición de la conductividad implican la medición in situ con sondas de conductividad eléctrica, como las sondas de cuatro electrodos en diferentes configuraciones geométricas. Para la medición de la permitividad relativa se investigó sobre los diferentes métodos utilizados en industria y academia. Dentro de estos métodos destaca la reflectometría como método para estimar las características eléctricas del suelo. Otras técnicas fueron estudiadas, como mediciones con sonda coaxial, de espacio libre, cavidad resonante y placas paralelas, donde se discutió cual de estos métodos es mas apropiado para los objetivos de esta tesis y el radiotelescopio MIST.

En el siguiente capítulo se describirá la metodología utilizada para aplicar las técnicas seleccionadas, tanto para la conductividad y la permitividad relativa, a la medición de los sitios predeterminados de MIST.

Capítulo 3

Metodología

Como fue discutido anteriormente, la caracterización del suelo es esencial para MIST. En este capítulo se describirá como se mide y estiman valores, tanto para la conductividad, como para la permitividad relativa del suelo, además de su validación y análisis posterior.

Este capítulo se concentrará en proveer una descripción detallada de los métodos utilizados para la caracterización del suelo, además del análisis de datos posterior requerido tanto para la conductividad y permitividad relativa. El capítulo comienza con la descripción de la implementación del método de Schlumberger para medir la conductividad, además de su posterior análisis de los datos medidos. El capítulo continúa con la descripción de la implementación del método de reflectometría en dominio de la frecuencia, utilizando una línea de transmisión como sonda, concluyendo con el análisis de los datos medidos con ayuda de software de simulación electromagnética y un algoritmo de optimización no lineal.

3.1. Conductividad

Para comprobar conductividad DC de los diferentes suelos, se midió con el método de Schlumberger, utilizando el telurímetro digital marca FLUKE modelo 1625, que se aprecia en la Fig. 3.1. Según lo visto en el Capítulo 2, este dispositivo mide la resistencia aparente R (dependiente de la disposición de los electrodos según el método utilizado), al calcular el cociente entre el voltaje medido en los electrodos interiores y la corriente que fluye entre los electrodos exteriores.

Si bien lo que se busca es medir la conductividad DC, este dispositivo utiliza un voltaje AC a las frecuencias 94, 105, 111 y 128 Hz [49] para descartar posibles interferencias o voltajes parásitos presentes producto de fenómenos electrocinéticos, como resultado de un electrolito fluyendo a través de las porosidades del suelo, o electroquímicos, producto de una diferencia en la concentración de un electrolito presente en el suelo.



Figura 3.1: Telurímetro FLUKE modelo 1625 utilizado en la medición de la conductividad DC del suelo

3.1.1. Método de Schlumberger

Para obtener el valor de la resistividad, se debe primero preparar el sitio a medir, considerando los siguientes pasos [50]:

- Elegir un sitio donde sea posible medir con electrodos. Usualmente no será posible medir en un sitio rocoso o donde existan elementos metálicos en las cercanías.
- Definir una línea recta que será el eje de medición sobre el cual irán los electrodos. Es recomendable posicionar una cinta de medir plástica larga, de al menos diez metros.

Una vez obtenido el valor de la resistencia aparente R , se debe obtener el valor de la resistividad aparente ρ_{Sch} , según la ecuación 2.2.

Con el objetivo de obtener información del perfil vertical del suelo, es necesario variar la distancia entre electrodos, usualmente el incremento es de forma exponencial para poder notar diferencias entre los puntos medidos a medida que la distancia entre electrodos es mayor. Se mantiene fija la distancia a entre los electrodos interiores, mientras que se varía la distancia entre los electrodos interiores y los exteriores, con distancia na . Estos datos son ordenados en una tabla, presentada como Tabla 3.1, para luego ser procesados en IPI2Win. Los detalles de la interpretación de los datos serán explicados en la sección siguiente.

3.1.2. Sondeo eléctrico vertical

Para la interpretación de los datos medidos según la metodología expuesta en la sección anterior, ya sea con el método de Wenner o de Schlumberger, se debe utilizar un software dedicado a este objetivo (Ver sección 2.1.3). Actualmente existen diferentes alternativas de softwares dedicadas a la interpretación de datos geofísicos en general, algunos más completos

N	a [m]	n	AB/2 [m]	R [Ω]	ρ_{Sch} Ω/m
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Tabla 3.1: Tabla de datos utilizada para las mediciones con el método de Schlumberger, a es la distancia entre los electrodos interiores, mientras que la distancia entre los electrodos interior y exterior es na , $AB/2$ es la mitad de la distancia entre los electrodos externos, R es la resistencia aparente y ρ_W es la resistividad aparente entregada por el método. Estas mediciones son posteriormente procesadas en algún programa de interpretación de datos de sondeo eléctrico vertical.

que otros, como WinResist, IX1D , o RES2DINV. En el desarrollo de esta tesis se eligió IPI2Win por su simplicidad, compatibilidad con casi todo computador y su libre acceso.

IPI2Win

Este software de interpretación de datos busca la curva teórica que minimiza la diferencia entre ésta y la medición. En la figura 3.2, se puede apreciar una captura de la interfaz gráfica de usuario del software utilizado. Entre las características principales de este software se encuentran:

- Interfaz amigable con el usuario: IPI2Win tiene una interfaz gráfica que hace fácil la importación y procesamiento de los datos de Sondeo Eléctrico Vertical. El software fue diseñado para guiar al usuario a través del proceso de la interpretación de datos, con diferentes herramientas.
- Generación de gráficos: IPI2Win provee al usuario resultados gráficos en 2D o 3D dependiendo del tipo de medición realizada, que permite al usuario visualizar la distribución espacial de parámetros como la conductividad/resistividad.
- Parámetros personalizables: Este software permite al usuario elegir varios parámetros, como el número de capas y la resolución del modelo para obtener un resultado más acertado y fidedigno a lo que el usuario necesita.
- Validación: IPI2Win además entrega información del error asociado al resultado entregado. El valor del error es la diferencia relativa porcentual. Los modelos estimados por este software son bastante idealizados, por lo que los resultados entregados pueden alejarse a los de una estructura compleja en el suelo, mas bien heterogéneo.

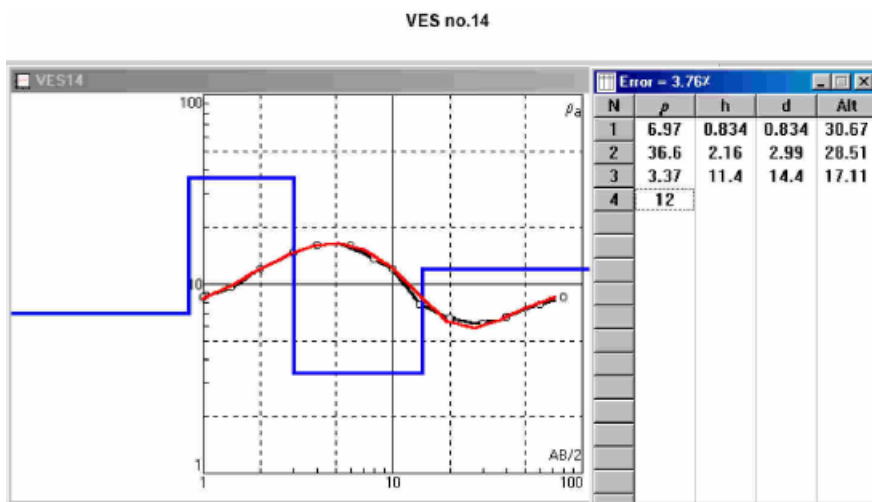


Figura 3.2: Captura de pantalla del software utilizado para el interpretación de datos del Sondeo Eléctrico Vertical, utilizado tanto para el método de Wenner como el de Schlumberger. Este caso corresponde a un modelo de cuatro capas del suelo. El eje horizontal representa la distancia, tanto para la curva de resistividad (en rojo y negro) como para representar el espesor de cada capa (en azul).

Principio de funcionamiento: IPI2Win es capaz de realizar interpretación 1D interactiva con una variedad de arreglos de electrodos comúnmente utilizados, para secciones verticales con resistividad constante en el rango de 0.0001 a 10000. En particular este software, resuelve el problema directo, es decir, encuentra el modelo teórico del suelo que predice la curva medida, mediante el uso de filtros lineales. El problema inverso es resuelto mediante una variante del algoritmo de Newton para el número de capas, y el algoritmo de regularización de Tikhonov [51] para resolver los parámetros de resistividad. El error entregado por el software entre la mejor curva teórica y la medida se calcula mediante la diferencia porcentual relativa de la forma [52]

$$RPD = \frac{|R_1 - R_2|}{\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)} \times 100 \%. \quad (3.1)$$

IPI2Win además permite restringir los parámetros del modelo a resolver, como el número de capas, el espesor de éstas o incluso el valor de la resistividad de alguna o más capas. Otra prestación de este software es la posibilidad de combinar mediciones de sondeo eléctrico vertical en más de algún eje, pudiendo incluso crear perfiles en 3D del suelo a medir.

3.1.3. Terrenos medidos

Los terrenos medidos con este método son sitios que debido a su localización y geografía son muy parecidos a un eventual sitio de medición de MIST, siendo estos principalmente desérticos. En la Fig. 3.3 se muestran fotografías de los tres terrenos y en la Fig. 3.4 su localización aproximada. Estos terrenos son,



(a) Deep Springs



(b) Death Valley



(c) Cancha de Fútbol

Figura 3.3: Terrenos medidos con el método de Schlumberger



(a) Deep Springs



(b) Death Valley

Figura 3.4: Localización aproximada de los sitios candidatos medidos para el radiotelescopio MIST

- **Deep Springs:** Localizado en el desierto de California, Estados Unidos. Terreno principalmente desértico y arenoso.
- **Death Valley:** Localizado en el desierto de Nevada, Estados Unidos. Terreno principalmente arenoso.
- **Cancha de Fútbol:** Localizado en Santiago, Chile. Terreno principalmente húmedo y con vegetación. Es importante mencionar que este terreno es medido sólo para la comprobación del método.

3.2. Permitividad relativa del suelo

Para medir y estimar la permitividad relativa del suelo, se utilizó el método de líneas de transmisión particularmente aplicando reflectometría en el dominio de la frecuencia, en conjunto con simulaciones electromagnéticas y un algoritmo de optimización no lineal.

3.2.1. Reflectometría en dominio de la frecuencia

La línea de transmisión a utilizar corresponde a una línea bifilar paralela, fabricada con barras de cobre, unida por dos cables de cobre que llevan a un conector SMA hembra de $50\ \Omega$. Un diagrama de la línea de transmisión utilizada se puede apreciar en la Fig. 3.5. Las dimensiones de la sonda son $L = 25\text{ cm}$, $S = 5\text{ cm}$, $D = 6,35\text{ cm}$. Durante el desarrollo de esta tesis, se construyeron diferentes tamaños de la línea de transmisión, variando su largo, grosor del conductor y separación, no encontrando grandes diferencias en los resultados preliminares.

Para mantener la separación de ambos conductores, se fabricó en PLA¹ un separador que mantiene la distancia entre las barras siempre en 5 cm. El PLA utilizado tiene una densidad del 5 % (el volumen del separador es 5 % PLA y el resto es aire). Este separador tiene un alto de 3 cm que influye en la distancia total a la cual la línea de transmisión puede introducirse en el suelo, permitiendo introducir solo 22 cm al suelo. Sin embargo, este separador es parte del modelo utilizado en la simulación, siendo posible anular el efecto. Una fotografía de la línea de transmisión utilizada se puede ver en la Fig. 3.6.

Para la medición de coeficiente de reflexión de la línea de transmisión, se utilizó un VNA modelo nanoVNA que tiene una capacidad de medir entre 50 kHz. y 900 MHz [53]. Se escogió este modelo por su buen desempeño en el rango de frecuencias deseado, su portabilidad y bajo costo. Los datos medidos son luego exportados para ser analizados posteriormente. Se puede ver una fotografía del equipo utilizado en la Fig. 3.7. En el desarrollo de esta tesis, se midió particularmente el coeficiente de reflexión complejo, separado en parte real e imaginaria.

¹El ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en la impresión 3D mediante el proceso de modelado por deposición fundida.

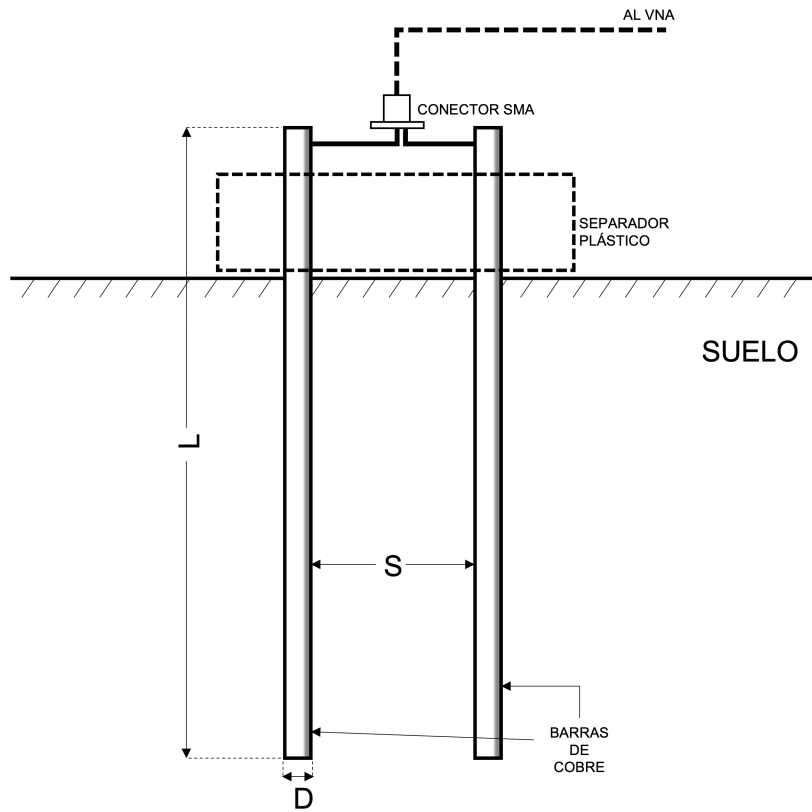


Figura 3.5: Diagrama de la línea de transmisión a utilizar como sonda en el suelo.



Figura 3.6: Línea de transmisión de 25 cm. con separador plástico utilizada en la mediciones de suelo.

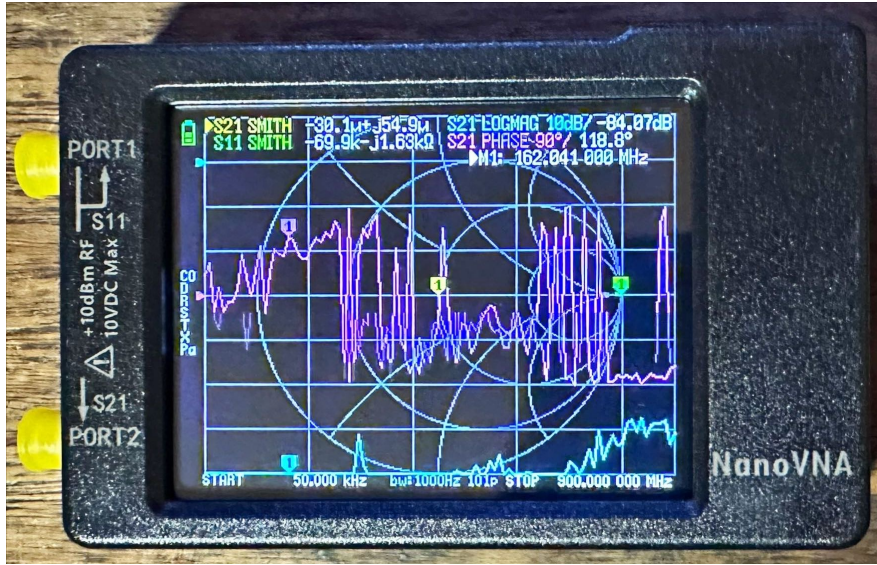


Figura 3.7: VNA utilizado para las mediciones en dominio de frecuencia, modelo NanoVNA

3.2.2. Simulación

Para obtener los parámetros de conductividad y permitividad del suelo, se debe tener un modelo capaz de recibir estos parámetros y replicar la curva del coeficiente de reflexión correspondiente a esos valores entregados. En esta tesis, el modelo corresponde a una simulación electromagnética realizada en HFSS (*High-Frequency Structure Simulator*), donde los parámetros variables corresponden a los valores de permitividad y conductividad del suelo.

La simulación de HFSS recibe las dos variables (ϵ, σ) y entrega un arreglo de datos correspondiente al coeficiente de reflexión S_{11} de la sonda simulada. Este arreglo de datos se usa para obtener el error cuadrático medio (MSE por sus siglas en inglés) de la simulación, de la forma

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_{11i} - \hat{S}_{11i})^2 \quad (3.2)$$

donde N es el largo de la muestra, S_{11i} corresponden a elementos de la medición y \hat{S}_{11i} corresponden a elementos de la simulación. Vale recordar que el coeficiente de reflexión S_{11} es un número complejo, por lo que la fórmula anterior debe calcularse tanto para la parte real $Re(S_{11})$ como la imaginaria $Im(S_{11})$. De esta forma, el modelo en HFSS en conjunto con la simulación número j se comportan como una función de dos variables, de la forma.

$$f(\epsilon_j, \sigma_j) = MSE_{j,real} + MSE_{j,imag}. \quad (3.3)$$

El objetivo final es encontrar las variables ϵ_j y σ_j que minimicen la función f . El algoritmo de optimización a utilizar es el algoritmo conocido como Optimización de Partículas de Enjambre, o PSO por sus siglas en inglés (*Particle Swarm Optimization*), que se detallará en

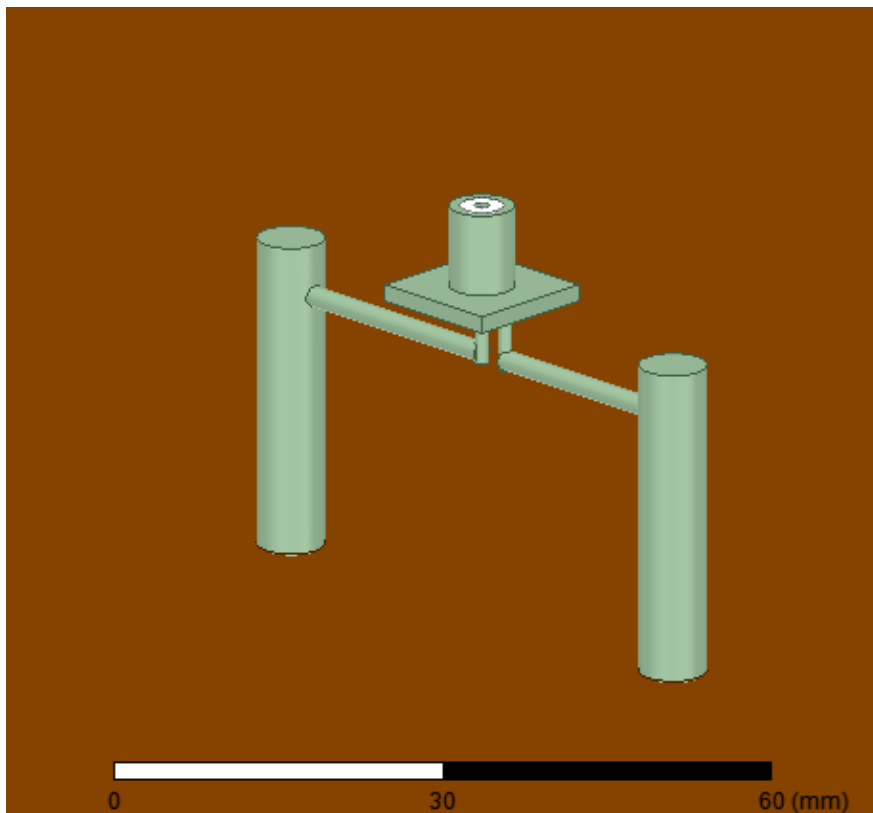


Figura 3.8: Modelo CAD utilizado en HFSS, donde se puede apreciar el detalle geométrico implementado en la simulación. Para una mejor visualización, se ocultó el separador de PLA presente en la simulación.

la siguiente sección.

HFSS

El modelo de HFSS de la línea de transmisión, es un modelo en tres dimensiones generado por computadora que usa el método de elementos finitos (FEM) para analizar y simular el comportamiento electromagnético de la línea de transmisión. El modelo consiste en una representación tridimensional de la geometría de la línea de transmisión, incluyendo el conductor, el dieléctrico y el entorno circundante. La simulación en HFSS es utilizada para computar la propagación de las ondas electromagnéticas a lo largo de la línea de transmisión y evaluar el desempeño de la línea bajo diferentes condiciones, como la permitividad relativa y conductividad del suelo.

La precisión y calidad de la simulación son críticos para obtener resultados confiables y cualquier error o imprecisión en el modelo puede impactar considerablemente los resultados finales. Es por esto que este modelo, fue creado midiendo con rigor cada dimensión de la línea de transmisión original. En la Fig. 3.8 se presenta una captura de la simulación utilizada para el análisis de datos de todas las mediciones.

3.2.3. Particle swarm optimization

Este es un algoritmo de optimización no lineal, capaz de encontrar mínimos globales de funciones que no necesariamente pueden ser expresadas de forma analítica. Este algoritmo de optimización es utilizado frecuentemente en industrias como la eléctrica para calcular variables dentro de la red de distribución eléctrica en un país [54] o para encontrar las dimensiones óptimas de alguna antena [10] y [55]. Entre las ventajas de este método se pueden nombrar,

- *Simplicidad:* PSO es un algoritmo relativamente fácil de implementar y no requiere recursos computacionales excepcionales.
- *Robustez:* El PSO es un algoritmo robusto, capaz de resolver eficientemente problemas con un gran número de variables y restricciones, además puede manejar funciones no lineales ruidosas.
- *Rápida convergencia:* El algoritmo es conocido por su rápida convergencia, en un relativamente pequeño número de iteraciones.
- *No requiere información del gradiente:* A diferencia de otros métodos, como el método del descenso del gradiente o el algoritmo de Levenberg-Marquardt, PSO no requiere información del gradiente, lo que lo hace ideal para optimizar funciones complejas discontinuas y no diferenciables.
- *Optimización global:* Este algoritmo de optimización puede buscar la solución en el espacio de solución completo, lo que lo hace bueno para evitar mínimos locales.
- *Facil paralelización:* Debido a su simplicidad, este método es fácil implementarlo en varios procesadores o computadores simultáneamente.

Este modelo parte creando N vectores $(\varepsilon_j, \sigma_j)$, con $j = (1, \dots, N)$ llamados partículas dentro del espacio de soluciones posibles y calculando su valor de la función f a minimizar, y según estos valores generar una nueva generación de partículas que recorren el espacio de soluciones. El algoritmo se detiene ya sea cuando se encuentra un valor deseado o se supere un número de iteraciones (generaciones) determinado previamente. Un diagrama de flujo de este algoritmo puede ser visto en la Fig. 3.9

Este algoritmo se implementó en Python en conjunto con HFSS, haciendo uso de la fácil integración entre esta software y el lenguaje de programación. El mismo código es utilizado tanto para simular en HFSS como para implementar el PSO. Si bien anteriormente se menciona que el PSO es un algoritmo de rápida convergencia, los recursos computacionales son consumidos principalmente por la simulación de HFSS, por lo que en términos generales, integrando HFSS y PSO, este método no es rápido, pudiendo tardar cerca de 20 horas en encontrar un resultado aceptable.

Para las mediciones de esta investigación se implementó este algoritmo con un número de partículas mayor o igual 7, y un máximo de 40 iteraciones, dando un total de al menos 280 simulaciones por conjunto de datos medidos.

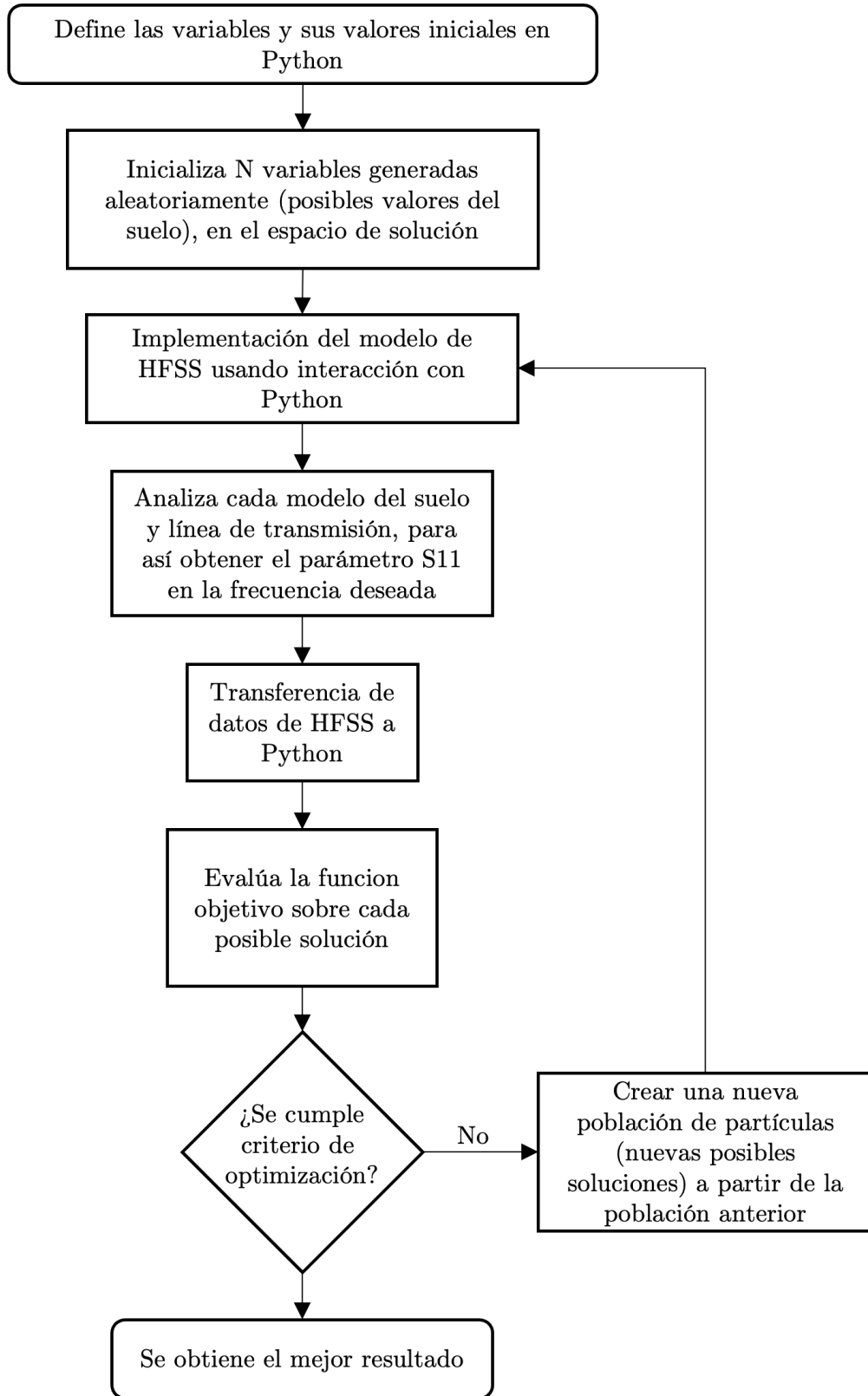


Figura 3.9: Diagrama de flujo para la implementación del PSO

3.2.4. Terrenos medidos

Los lugares medidos mediante este método fueron analizados en el rango deseado de 50-120 MHz. Y fueron los mismos descritos en la sección 3.1.3.

Al igual que en la sección anterior de conductividad, la elección de estos terrenos, se debe principalmente a que son sitios que cumplen las características que requiere MIST. Cabe mencionar, que para los sitios Deep Springs y Death Valley, las mediciones de permitividad y conductividad se realizaron el mismo día. Además la medición del terreno Cancha de Fútbol fue utilizado sólo como comprobación del método.

3.3. Comprobación de los Métodos

En esta sección se discute sobre las mediciones preliminares, tanto de conductividad como de permitividad relativa, cuyos resultados fueron comparados directamente con valores de referencia existentes en la literatura (Ver Fig. 1.15). De esta forma, es posible comprobar la validez del método a la hora de medir en terrenos candidatos para MIST.

Estas mediciones preliminares de conductividad y permitividad fueron realizadas en el terreno Cancha de Fútbol en la ciudad de Santiago. Además, para la comprobación del método de reflectometría, se midió la permitividad del agua y del aire.

3.3.1. Método de Schlumberger

Para esta comprobación, se midió con este método la conductividad del sitio Cancha de Fútbol en Santiago de Chile, donde se aplicó el método de Sondeo Eléctrico Vertical para la interpretación de los datos.

De acuerdo al modelo de interpretación de datos utilizado por IPI2Win, el modelo que mejor se ajustó a las curvas medidas fue el de tres capas. Estas capas cuentan con un espesor de 0,6 m y 1,65 m para las dos primeras, mientras la tercera se extiende infinitamente en profundidad. El error de ajuste asociado a esta curva encontrada es de 2,15%. La curva de resistividad aparente y el ajuste de la curva en IPI2Win se encuentra en la Fig. 3.10, y el detalle de las resistividades, conductividades y espesores de cada capa se encuentra en la Tabla 3.2.

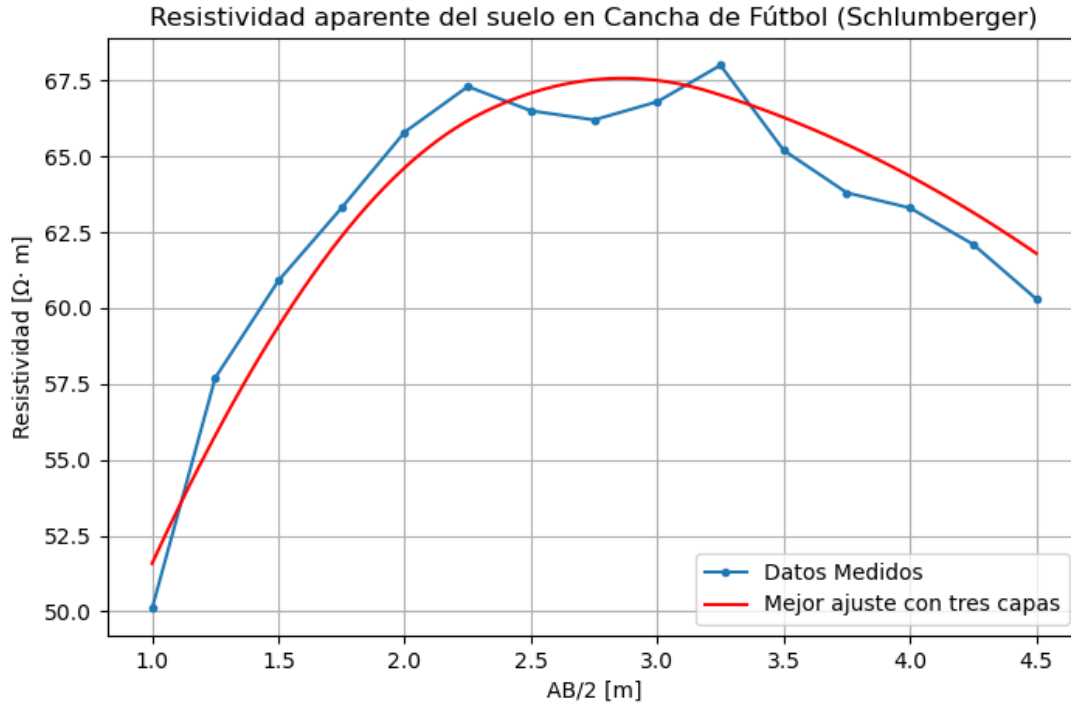


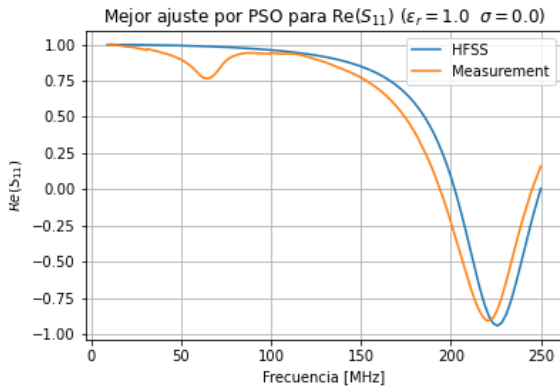
Figura 3.10: Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio denominado Cancha de Fútbol en Santiago de Chile. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de tres capas.

N	ρ [Ωm]	σ [S/m]	h [m]
1	41.9	0.02386	0.6
2	104.0	0.00961	1.65
3	24.1	0.04149	∞

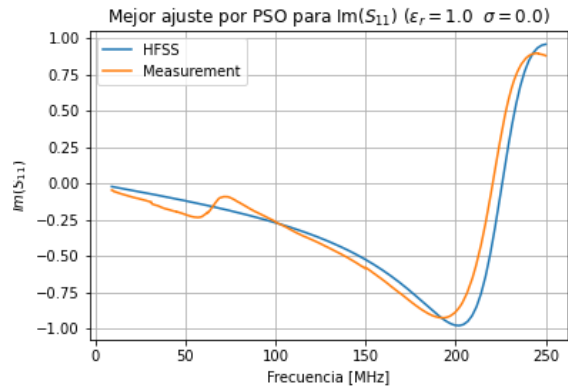
Tabla 3.2: Datos entregados por IPI2Win para la estructura de tres capas utilizando el método de Schlumberger para la cancha de fútbol. Error = 2.15 %.

3.3.2. Método de Reflectometría

Para esta comprobación, se midió con este método la permitividad relativa y conductividad tanto en agua y aire. Luego de comparar las mediciones anteriores, se midió en un terreno arbitrario dentro de la ciudad de Santiago para comprobar la factibilidad de medir en suelo, destacándose la utilización de ciertas técnicas para las mediciones principales enfocada a potenciales terrenos de MIST.

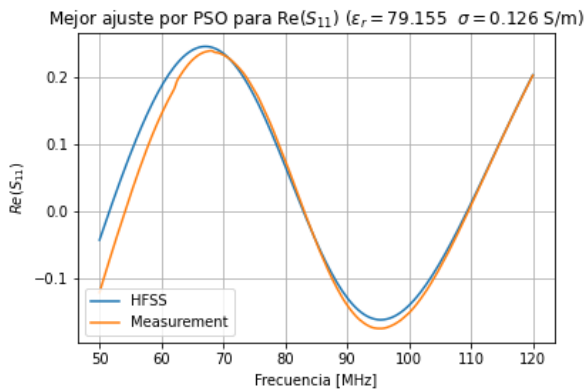


(a) Parte real

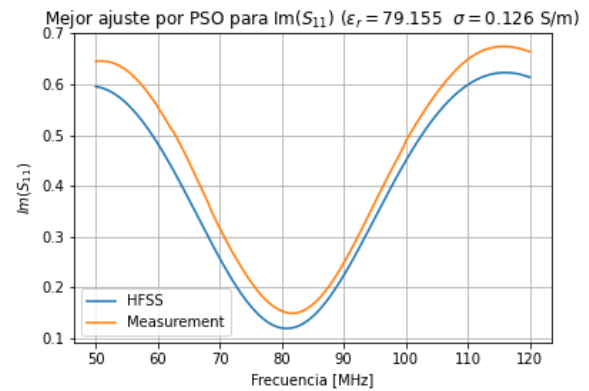


(b) Parte imaginaria

Figura 3.11: Resultados de la optimización PSO para aire.



(a) Parte real



(b) Parte imaginaria

Figura 3.12: Resultados de la optimización PSO para agua potable.

Mediciones en aire

En la Fig. 3.11 se pueden apreciar las curvas con el mejor ajuste encontradas por el algoritmo PSO para las mediciones en aire. Se encontró que la permitividad relativa fue de $\epsilon_r = 1,0$, y la conductividad $\sigma = 0 \text{ S/m}$. Es importante mencionar que medición fue realizada en el rango 9-250 MHz. Esta extensión en el rango de frecuencia de medición en aire se debe principalmente a la poca variabilidad en las reflexiones dentro del rango 50-120 MHz.

Mediciones en agua

Las mediciones realizadas en agua fueron realizadas dentro de una bañera con agua domiciliar. En la Fig. 3.12 se muestran las curvas real e imaginarias medidas del coeficiente de reflexión S_{11} junto con el mejor ajuste encontrado por el algoritmo PSO, obteniendo una permitividad relativa $\epsilon_r = 79,155$ y una conductividad $\sigma = 0,126 \text{ S/m}$. Estas mediciones fueron tomadas en el rango 50-120 MHz.

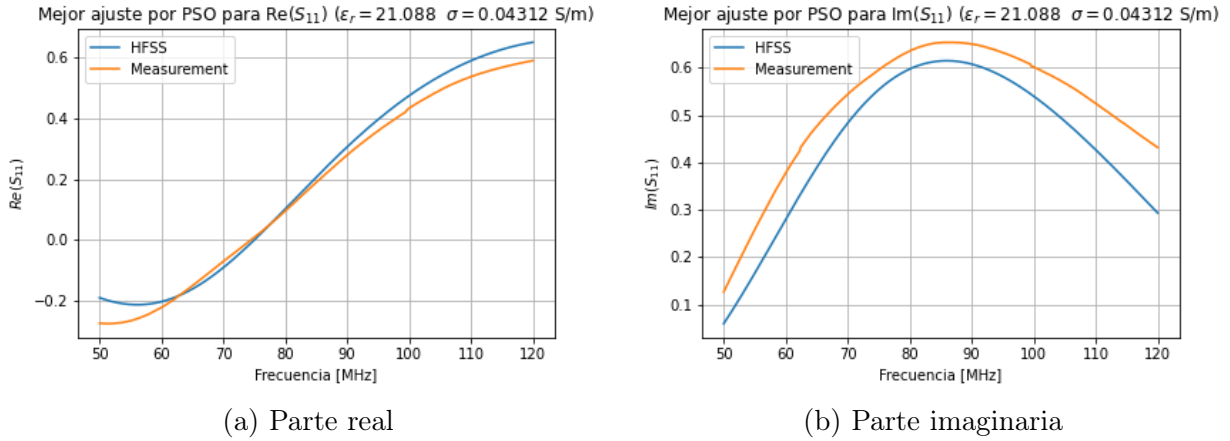


Figura 3.13: Resultados de la optimización PSO para el sitio Cancha de Fútbol en la ciudad de Santiago.

Mediciones en Tierra

Para comprobar la factibilidad de medir en terreno, se midió la permitividad relativa con este método en un sitio arbitrario, una cancha de fútbol dentro de la ciudad de Santiago. Este sitio fue medido durante el invierno de 2022, con una humedad elevada y gran cantidad de vegetación (pasto). Se debe aclarar que el modelo utilizado fue de una sola capa infinita, dado que el instrumento se entierra 25 cm en el suelo, por lo que no se consideran variaciones en esa capa. En la Fig. 3.13 se muestran las curvas real e imaginarias medidas del coeficiente de reflexión S_{11} junto con el mejor ajuste encontrado por el algoritmo PSO, obteniendo una permitividad relativa $\epsilon_r = 21,088$ y una conductividad $\sigma = 0,04312$ S/m. Estas mediciones fueron tomadas en el rango 50-120 MHz.

3.3.3. Validez de los datos preliminares

Método de Schlumberger: Para las mediciones preliminares del método de Schlumberger, es muy difícil determinar la precisión del método, ya que con las herramientas disponibles se desconoce un valor acertado de la conductividad real del suelo medido. Sin embargo, consultando la Fig. 1.15, un suelo margoso seco como el de la cancha de fútbol, debe tener su conductividad en el orden de entre 10^{-4} y 10^{-2} S/m, siendo este el caso con una conductividad de su capa superior de 0.02386 S/m, la segunda capa también se encuentra dentro de este rango con una conductividad 0.00961 S/m.

Estas mediciones preliminares también cumplen el propósito de familiarizarse con el método y su análisis de datos con IPI2Win, siendo bastante directa su aplicación a los datos medidos. Dado esto último, se procede a utilizar el método en los diferentes terrenos candidatos para MIST.

Método de Reflectometría: Para las mediciones preliminares de este método, se puede apreciar en la Fig. 3.11 que el valor entregado por el método para el aire es idéntico al esperado

(según Fig. 1.15), con valores para la permitividad relativa $\varepsilon_r = 1,0$ y la conductividad $\sigma = 0,0$ S/m. En la Fig. 3.12 podemos ver las mediciones realizadas en agua, donde los valores entregados por el método son de $\varepsilon_r = 79,155$ para la permitividad relativa, con un error de solo un 2.27 % con respecto al valor de referencia de 81,0 y un valor de 0,126 S/m para la conductividad, donde el valor esperado es entre 10^{-4} y 10^{-2} S/m, pero este valor es relativo, ya que es directamente dependiente de la temperatura y la cantidad de minerales disueltos en ella [56].

Las mediciones en tierra entregan una permitividad relativa de $\varepsilon_r = 21,088$ y una conductividad $\sigma = 0,04312$ S/m, y según los valores de la Fig. 1.15 se encuentran dentro del rango para la tierra margosa húmeda. Estas mediciones en conjunto, son suficiente para comprender el método y aplicar su uso en mediciones en terrenos candidatos para MIST.

3.4. Resumen

En este capítulo se presentó en profundidad la metodología a utilizar para la obtención y posterior análisis de los datos, tanto para obtener la conductividad y permitividad relativa. Además se presentaron los diferentes terrenos que son parte de las campañas de mediciones para el desarrollo de esta tesis. Adicionalmente se presenta una breve comprobación de los métodos, donde se midió en materiales de fácil acceso y/o con un valor conocido en la literatura. En el siguiente capítulo se presentarán los resultados de las mediciones y los valores obtenidos por los diferentes métodos en sitios de observación de MIST, además del análisis y discusión de cada resultado, tomando en consideración el terreno y el método utilizado.

Capítulo 4

Resultados, Análisis y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de las diferentes mediciones realizadas en suelo de sitios de observación de MIST. Se describen las mediciones de conductividad y permitividad relativa utilizando los métodos descritos en el Capítulo 3. Los datos recolectados de estas mediciones sirvieron como base para el subsecuente análisis y discusión, permitiendo profundizar en las características y comportamiento, tanto del suelo como del método utilizado.

El análisis de estos datos busca visualizar los datos utilizando tablas y gráficas con el objetivo de encontrar patrones, implicancias o valores notables dentro de los resultados obtenidos tanto para la conductividad como la permitividad relativa.

Posteriormente se continúa con una discusión sobre los datos medidos, donde se busca comparar los resultados obtenidos con valores de referencia para diferentes materiales conocidos. De esta manera se puede estimar que tipo de material principal que compone el suelo. Además, se busca explicar la manera en que cada material afecta cada uno de los valores medidos, y las diferencias que deben tomarse en cuenta al instalar el radiotelescopio MIST en un determinado lugar.

4.1. Resultados para la conductividad del suelo

En esta sección se presentan los resultados de las diferentes mediciones del suelo con el método de Schlumberger en dos sitios de observación de MIST: Deep Springs y Death Valley. Las mediciones son presentadas en un gráfico de resistividad aparente en función de la distancia de los electrodos, junto con la mejor curva encontrada mediante el programa IPI2Win. Además se presenta una tabla indicando la resistividad, conductividad y espesor para cada una de las capas.

Luego de la exposición de los datos, se provee un análisis de los datos de conductividad, buscando algún patrón o valor notable que implique alguna diferencia relevante dentro de la estructura de capas.

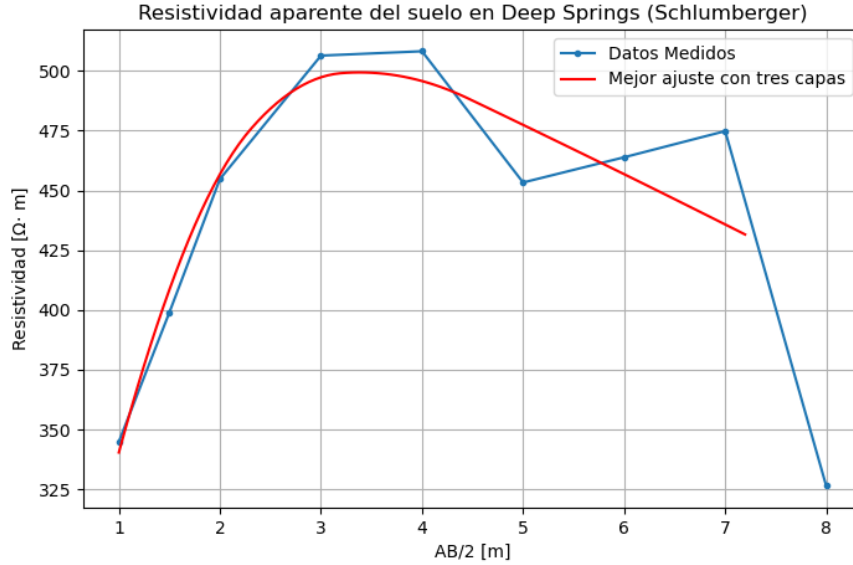


Figura 4.1: Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio de Deep Springs en California. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de tres capas.

N	ρ [Ωm]	σ [S/m]	h [m]
1	258	0.003875	0.6
2	972	0.001028	0.949
3	339	0.002949	∞

Tabla 4.1: Datos entregados por IPI2Win para la estructura de tres capas en el sitio Deep Springs, utilizando el método de Schlumberger. Error = 2.33 %.

4.1.1. Resultados en Deep Springs

En el sitio Deep Springs del desierto de California y de acuerdo al modelo de interpretación de datos utilizado por IPI2Win se obtuvieron las conductividades de la Tabla 4.1 para un modelo de tres capas, que es el que mejor se ajusta a la curva medida. Estas capas cuentan con un espesor de 0,6 m y 0,949 m para la primera y segunda capa respectivamente, mientras que la tercera se extiende infinitamente en profundidad. El error de ajuste asociado a esta curva encontrada es de 2,33 %. La curva de resistividad aparente y el ajuste de la curva en IPI2Win se encuentra en la Fig. 4.1, y el detalle de las resistividades, conductividades y espesores de cada capa se encuentra en la Tabla 4.1.

Según lo mostrado en la Tabla 4.1, dentro de las tres capas descritas por el modelo de IPI2Win, hay algunas diferencias en su conductividad, pero siendo todas del mismo orden de magnitud. La capa intermedia, que se encuentra a 0,6 m de profundidad, tiene una conductividad cerca de tres veces menor a las otras.

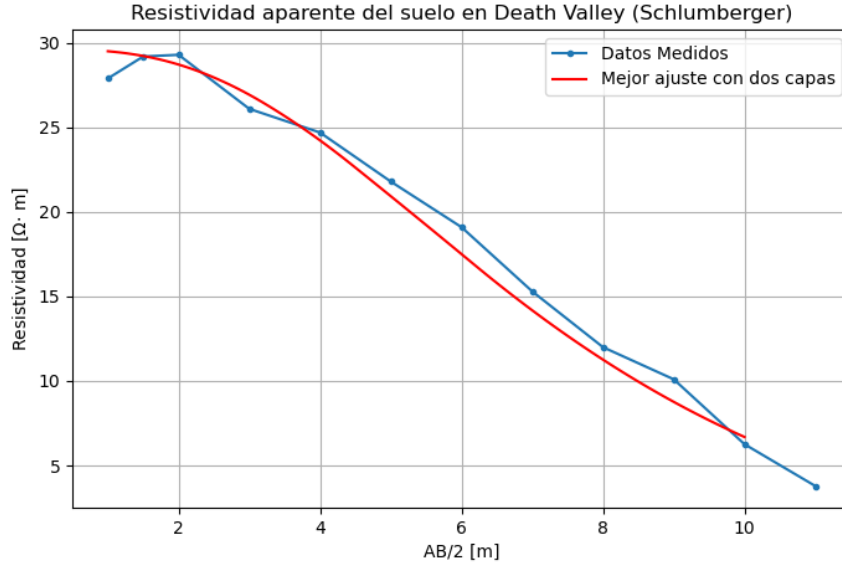


Figura 4.2: Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio de Death Valley en Nevada. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de dos capas.

N	ρ [Ωm]	σ [S/m]	h [m]
1	29.6	0.03378	3.74
2	0.0691	14.4717	∞

Tabla 4.2: Datos entregados por IPI2Win para la estructura de dos capas en el sitio Death Valley, utilizando el método de Schlumberger. Error = 4.5 %.

4.1.2. Resultados en Death Valley

En sección se separa en resultados para dos o tres capas debido a la naturaleza del sitio, donde IPI2Win entrega resultados con un bajo error para ambas geometrías.

Resultados con dos capas

En el sitio de Death Valley en el desierto de Nevada y de acuerdo al modelo de interpretación de datos utilizado por IPI2Win se obtuvieron las conductividades de la Tabla 4.2. La estructura entregada consiste de dos capas, de las cuales la primera tiene un espesor de 3,71 m y la segunda se extiende infinitamente en profundidad. El error de ajuste asociado a esta curva encontrada es de 4,5 %. La curva de resistividad aparente y el ajuste de la curva en IPI2Win se encuentra en la Fig. 4.2, y el detalle de las resistividades, conductividades y espesores de cada capa se encuentra en la Tabla 4.2.

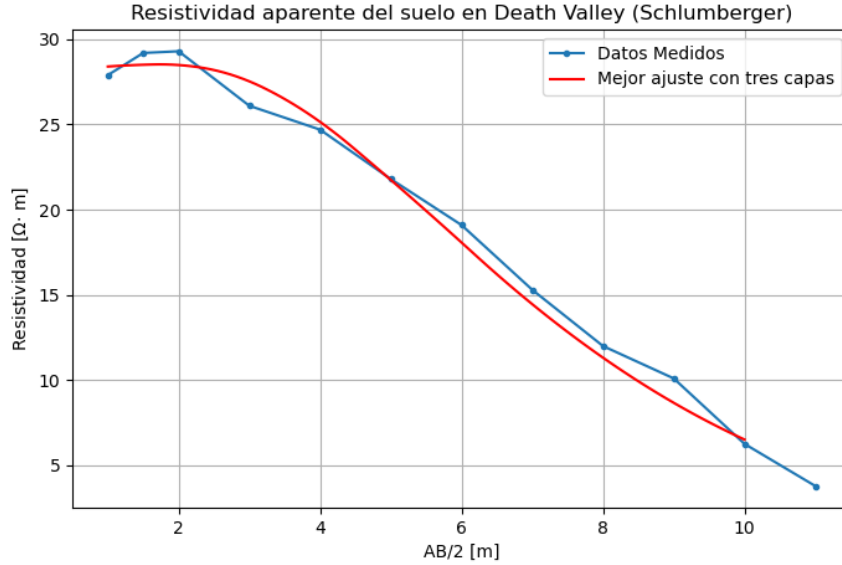


Figura 4.3: Resistividad aparente del suelo como función de la distancia $AB/2$, medida en el sitio de Death Valley en Nevada. En azul se grafica la resistividad aparente medida. En rojo se grafica la curva del mejor ajuste entregado por IPI2Win, para un modelo de tres capas.

N	ρ [Ωm]	σ [S/m]	h [m]
1	28.3	0.03533	1.49
2	39.8	0.02512	1.72
3	0.0691	14.4717	∞

Tabla 4.3: Datos entregados por IPI2Win para la estructura de tres capas en el sitio Death Valley, utilizando el método de Schlumberger. Error = 3.29 %.

Resultados con tres capas

En el mismo sitio y de acuerdo al modelo de interpretación de datos utilizado por IPI2Win se obtuvieron conductividades de la Tabla 4.3, para un modelo de tres capas que es el que se ajusta mejor a la curva medida. Estas capas cuentan con un espesor de 1,49 m la primera y 1,72 m la segunda, mientras la tercera se extiende infinitamente en profundidad. El error de ajuste asociado a esta curva encontrada es de 3,29 %. La curva de resistividad aparente y el ajuste de la curva en IPI2Win se encuentra en la Fig. 4.3, y el detalle de las resistividades, conductividades y espesores de cada capa se encuentra en la Tabla 4.3.

4.2. Resultados para la permitividad del suelo

En esta sección se presentan los resultados de las diferentes mediciones del suelo y materiales con reflectometría con línea de transmisión. Las mediciones se presentan junto con con las curvas del mejor ajuste encontrado por el PSO, tanto para la parte real, como la

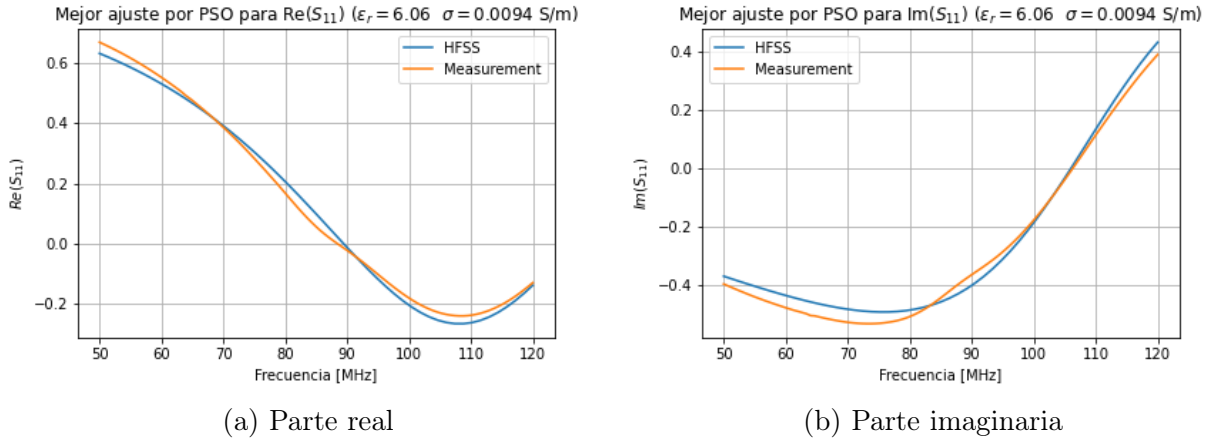


Figura 4.4: Resultados de la optimización PSO para el sitio Deep Springs en el desierto de California.

parte imaginaria. Además, se muestran los valores para la permitividad y conductividad encontrados por este algoritmo.

Los resultados en suelo se dividen según el sitio donde fueron medidas, ya sea Deep Springs, o Death Valley. Ambas mediciones fueron tomadas dentro del rango 50-120 MHz.

4.2.1. Deep Springs

Para el sitio Deep Springs, la mejor solución encontrada corresponde a los valores de permitividad $\epsilon_r = 6,06$ y conductividad $\sigma = 0,0094$ S/m. En la Fig. 4.4 se muestran las curvas medida y la ajustada, tanto para la parte real como la imaginaria. Es importante mencionar que el modelo utilizado corresponde al de una sola capa infinita y no de tres capas como se usó en 4.1.1. Esto se debe a que el instrumento sólo mide valores en los primeros 25 cm por la altura de la línea de transmisión.

4.2.2. Death Valley sin corrección del cable

Para el sitio de Death Valley, la mejor solución encontrada corresponde a los valores de permitividad $\epsilon_r = 2,46$ y conductividad $\sigma = 0,1212$ S/m. En la Fig. 4.5 se muestran las curvas medida y la ajustada, tanto para la parte real como la imaginaria. Al igual que en los resultados anteriores, el modelo utilizado corresponde a una capa infinita y no de tres capas como se usó en 4.1.2. Al igual que en la medición anterior, esto se debe a que el instrumento sólo mide los primeros 25 cm por la altura de la línea de transmisión.

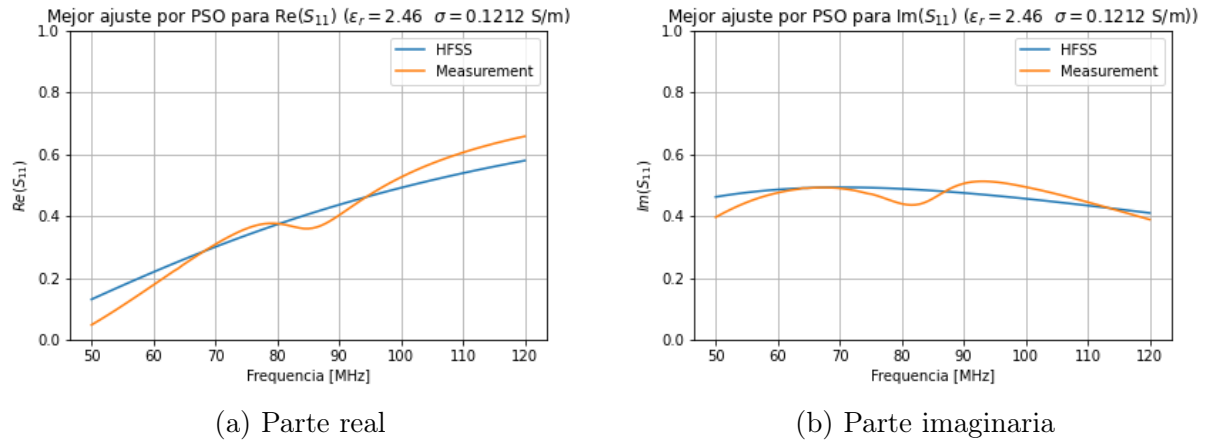


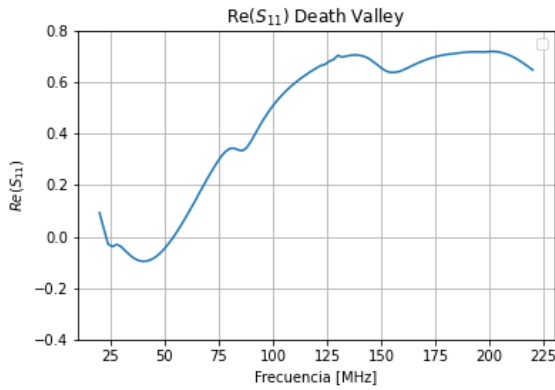
Figura 4.5: Resultados de la optimización PSO para el sitio Death Valley en el desierto de Nevada. En ambos gráficos se puede apreciar una anomalía entre 80-90 MHz. Esta se discutirá en la sección siguiente.

4.2.3. Death Valley con corrección de cable

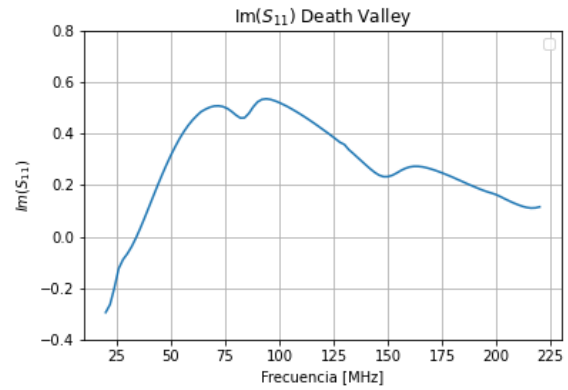
En la Fig. 4.6 se puede apreciar la medición en el rango completo de frecuencias medidas para el sitio Death Valley. Es posible notar ondulaciones anómalas cercanas a las frecuencias 20 MHz, 80 MHz y 150 MHz, además una anomalía menor cercana a los 210 MHz. Estas anomalías pueden ser encontradas aproximadamente cada ≈ 65 MHz, por lo que es natural sospechar de una resonancia dentro del sistema, pero considerando que la longitud de onda correspondiente a 65 MHz es de 4.6 m, es improbable una resonancia dentro de una línea de transmisión de 25 cm. Dentro de las posibles fuentes se puede señalar, la presencia de algún objeto bajo el suelo con características eléctricas muy diferentes tal que puedan provocar reflexiones no deseadas, resonancias debido a una mala o deficiente conexión eléctrica desde el cable SMA hacia las barras de cobre, resonancias dentro del VNA o resonancias dentro del cable. Esta anomalía se observó solo en Death Valley y no en Deep Springs.

Debido a la localización remota y la programación de las campañas de medición para el radiotelescopio MIST, solo fue posible repetir la medición una vez a pocos metros del lugar de la primera medición. La segunda medición se expone en la Fig. 4.7, siendo las curvas muy similares a las de la Fig. 4.6. Esto descartaría la presencia de algún objeto de pequeñas dimensiones bajo el suelo que provoque reflexiones no deseadas.

Para comprobar las influencias del cable, se midieron las reflexiones de un suelo en un sitio aleatorio en Chile, utilizando los mismos instrumentos utilizados en Deep Springs, es decir VNA, cable SMA y sonda. Durante estas mediciones, se encontró que existe una diferencia en las reflexiones al mover el cable SMA, en particular, se detectó la aparición de ondulaciones cuando el cable se encontraba completamente recto, al igual de como se efectuaron las mediciones en Estados Unidos. Las ondulaciones anómalas desaparecieron al curvar el cable como se muestra en le Fig. 4.8. En la Fig. 4.9 se muestran ambas mediciones, con el cable recto y curvo, donde se aprecia una diferencia entre ellas incluso cuando la configuración de la sonda y el VNA no ha cambiado.

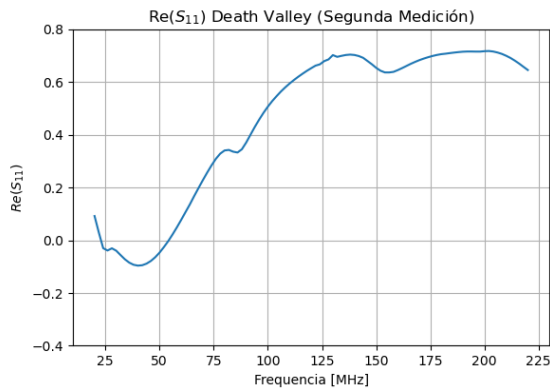


(a) Parte real

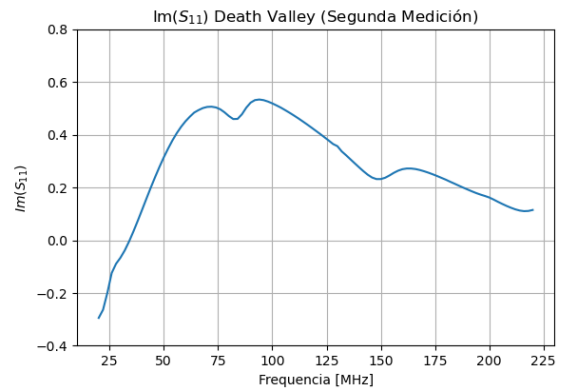


(b) Parte imaginaria

Figura 4.6: Medición real e imaginaria para el sitio Death Valley, en extensión completa, en el rango 20-220 MHz.



(a) Parte real



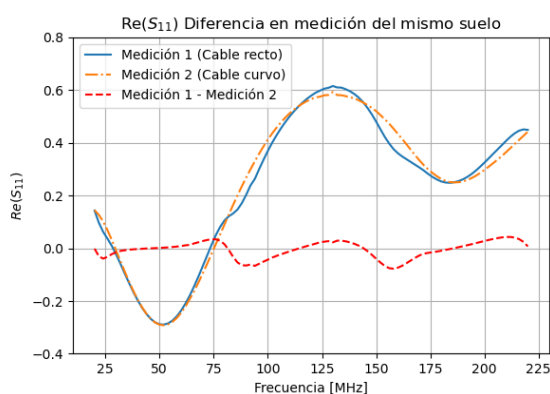
(b) Parte imaginaria

Figura 4.7: Segunda medición del S_{11} para el sitio Death Valley luego de encontrar la anomalía, en el rango 20-220 MHz. Se pueden apreciar nuevamente las ondulaciones cada ≈ 65 MHz.

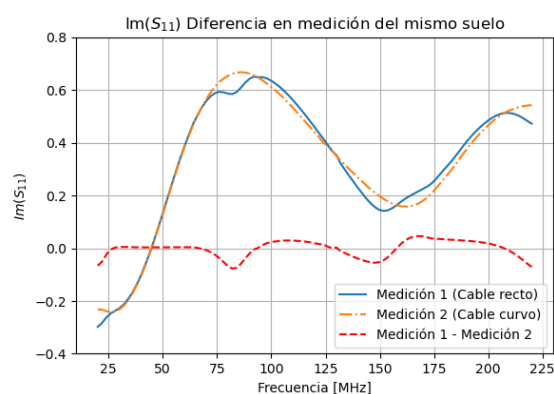
En la Fig. 4.9 se grafica en línea segmentada la diferencia aritmética entre ambas curvas medidas, donde es posible identificar las ondulaciones en las frecuencias 20 MHz, 80 MHz, 150 MHz y 210 MHz. Estas anomalías se pueden encontrar cada ≈ 65 MHz, al igual que la medición en Death Valley. Esta diferencia residual se considera ahora como la influencia del cable y se puede restar de las mediciones originales de Death Valley mostradas en la Fig. 4.6. La medición final, luego de este procesamiento, se muestra en la Fig. 4.10.



Figura 4.8: Curvatura realizada al cable que permitió una correcta medición con el método de reflectometría. Es importante aclarar que este cable fue el mismo utilizado en las campañas del sitio Death Valley.

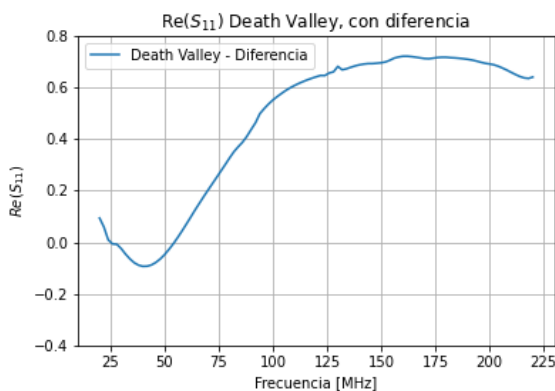


(a) Parte real

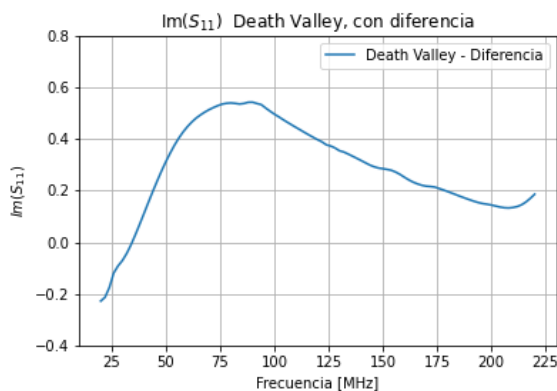


(b) Parte imaginaria

Figura 4.9: Mediciones real e imaginaria, para un sitio aleatorio en Chile. Incluso cuando la configuración del VNA o la sonda no ha cambiado se puede apreciar una diferencia en las reflexiones cuando el cable se encuentra curvo o recto.

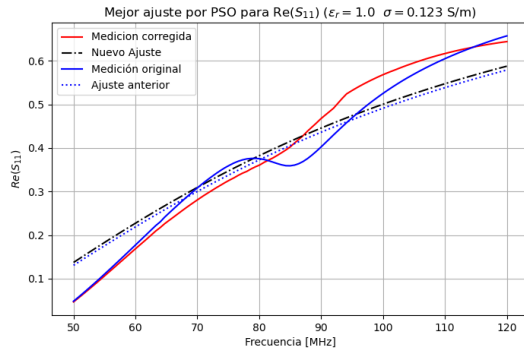


(a) Parte real

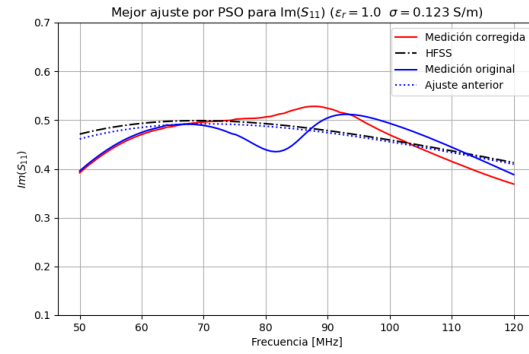


(b) Parte imaginaria

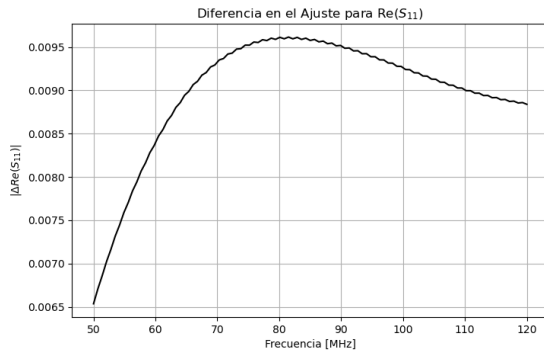
Figura 4.10: Mediciones de Death Valley, después de extraer el efecto de la curvatura del cable en las mediciones originales.



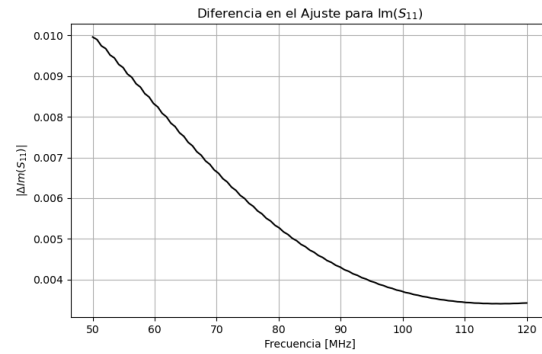
(a) Parte real



(b) Parte imaginaria



(c) Diferencia en la parte real



(d) Diferencia en la parte imaginaria

Figura 4.11: Resultados de la optimización PSO para el sitio Death Valley, después de la eliminación del efecto del cable torcido. (Arriba) En estos gráficos se pueden ver curva para el mejor ajuste de acuerdo al PSO, además de una comparación con las curvas antes de la corrección. (Abajo) En estos gráficos podemos ver la diferencia entre ambas curvas de ajuste del PSO.

Finalmente, dentro del análisis de permitividad relativa y conductividad, luego de aplicar la corrección descrita anteriormente, se utiliza el algoritmo PSO dentro del rango estudiado de 50-120 MHz. La mejor solución encontrada corresponde a los valores de permitividad relativa $\epsilon_r = 1,0$ y conductividad $\sigma = 0,123$ S/m. En las Figuras 4.11a y 4.11b se muestra la curva corregida junto con la curva de ajuste tanto para la parte real como la imaginaria, respectivamente. Además, como comparación se muestran las mediciones y ajustes antes de la corrección. En las Figuras 4.11c y 4.11d se muestran las diferencias entre los ajustes antes y después de las correcciones. Estas diferencias en el S_{11} entregadas por HFSS se pueden ver reflejadas en un cambio de la permitividad relativa proporcionada por el método, donde hubo un cambio en la permitividad relativa desde 2,46 (Ver Fig. 4.5) a un valor de 1,0 luego de la corrección.

En la Tabla 4.4, se muestra un resumen con todos los valores para la conductividad y permitividad relativa encontrados para los dos sitios medidos con estos métodos. Los contenidos de esta tabla se discutirán más adelante en la sección de discusión.

	Sondeo Eléctrico Vertical (Schlumberger)						Reflectometría	
	σ_1 [S/m]	h_1 [m]	σ_2 [S/m]	h_2 [m]	σ_3 [S/m]	h_3 [m]	σ_R [S/m]	ε_r
Deep Springs	0.003875	0.6	0.001028	0.949	0.002949	∞	0.0094	6.06
Death Valley	0.03533	1.49	0.02512	1.72	14.4717	∞	0.123	1.0

Tabla 4.4: Resumen de todos los valores para la conductividad y permitividad relativa encontradas. La columna de σ_S corresponde a la conductividad determinada por el método de Schlumberger. Las columnas de σ_R y ε_R corresponden a la conductividad y permitividad respectivamente encontrada por el método de reflectometría.

4.3. Discusión

Esta sección se enfoca principalmente en resumir e interpretar los resultados de la sección anterior, además de su implicancia dentro del contexto de esta tesis y las limitaciones apreciables que puedan ser relevantes a la investigación.

4.3.1. Deep Springs

En el sitio Deep Springs se obtuvieron conductividades relativamente bajas, del orden de 10^{-3} S/m para todas las capas del modelo Schlumberger. El método de reflectometría, si bien entregó una conductividad cerca de 3 veces mayor, se encuentra del mismo orden de magnitud.

Si miramos la Fig. 4.1, podemos apreciar que la resistividad aparente es inicialmente cercana a los 350 Ω m, luego sube a cercano a los 500 Ω m, para nuevamente disminuir cercano a los 325 Ω m. Este comportamiento puede ser explicado por un aumento del voltaje medido por los electrodos interiores, a medida que se alejan los electrodos exteriores. Esto es posible si consideramos que la segunda capa tiene una resistividad mayor, como se aprecia en la Tabla 4.1. Además, a medida que sigue aumentando la distancia entre los electrodos exteriores, existe un aumento de la corriente que circula entre éstos ya que la tercera capa de espesor infinito, tiene una resistividad menor en comparación con la segunda. Al aumentar la corriente y disminuir el voltaje, vemos que la resistividad aparente disminuye.

Si analizamos el valor de la permitividad relativa de 6.06 entregada por el método de reflectometría junto la naturaleza arenosa y seca del sitio, se puede ver que este valor coincide con el entregado por la tabla de la Fig. 1.15 para un suelo arenoso y seco. Sin embargo es necesario agregar que el tipo de suelo de Death Valley fue descrito solo de forma cualitativa sin algún método riguroso y debe tomarse como una limitación a la hora de comparar con la literatura existente.

De forma general, se puede argumentar que se cumplieron las expectativas de obtener valores cercanos para la conductividad con ambos métodos a pesar de sus diferentes formas de abordar el problema. También se cumplieron las expectativas de obtener valores para la conductividad y permitividad dentro de los rangos aceptados por la literatura para el tipo de suelo medido.

Si bien en esta ocasión ambos métodos obtuvieron resultados bastante similares, es necesario mencionar que una comparación directa no es adecuada sin tener en cuenta que la frecuencia de medición no es la misma, el método de Schlumberger mide en el orden de los 100 Hz, mientras que la reflectometría se realiza en el orden de los 100 MHz. Si se considera que el radiotelescopio MIST mide en el rango 25-105 MHz, esto implica debe entenderse el método de Schlumberger como una primera aproximación para conocer el suelo en bajas frecuencias y no utilizarse directamente en el aporte a la señal medida por el radiotelescopio.

4.3.2. Death Valley

Con el método de Schlumberger se obtuvo una estructura de dos y tres capas con un muy bajo error de ajuste, con 3,29 % y 4,5 % respectivamente. Si bien la estructura de tres capas tiene un error menor, las dos primeras capas tienen un valor muy similar, por lo que el modelo de dos capas es más representativo de la geometría del subsuelo. La última capa tiene una conductividad considerablemente mayor, del orden de 10^1 S/m.

En la figura 4.3 podemos ver que a medida que los electrodos exteriores se alejan, esto es cuando existe un aumento de la distancia $AB/2$, existe una disminución casi lineal de la resistividad aparente medida. Este comportamiento puede ser explicado si el suelo tiene cambios en su estructura de capas, es decir, heterogéneo. El voltaje medido en los electrodos interiores disminuye de forma inversamente proporcional a la distancia entre los electrodos, manteniendo una corriente constante, por lo tanto, obteniendo una resistividad aparente menor a una mayor distancia de los electrodos. La corriente constante entre los electrodos exteriores experimenta dos fenómenos diferentes, a medida que se alejan los electrodos, existe un mayor camino recorrido por el suelo, aumentando su resistencia y por consiguiente disminuyendo la corriente. Sin embargo, generalmente la corriente fluye en un arco bajo el suelo entre los electrodos exteriores, y por tanto, a mayor separación, mayor es la profundidad a la cual fluirá la mayor parte de la corriente. Si en este caso, las capas inferiores tienen una conductividad mayor, el valor de la corriente subirá. Estos dos efectos se contrarrestan, dando como resultado una corriente constante y un voltaje que disminuye con la distancia, causando así una resistividad aparente decreciente con la distancia.

El método de reflectometría arroja una permitividad aparente de 1.0 y una conductividad de 0.123 S/m y si comparamos todos los datos a los de la Fig. 1.15 y si tomamos en cuenta la composición arcillosa del sitio, se puede ver que la conductividad se encuentra dentro de los rangos esperados para la arcilla húmeda. La permitividad relativa de 1.0 también se ajusta bien a la arcilla de la primera capa. El método de Schlumberger entregó tres valores para la conductividad, correspondiendo las dos primeras capas a arcilla seca, y la tercera a una arcilla húmeda. Esto último puede ser explicado por una capa de agua en profundidad (cerca de los 3 m si consideramos la profundidad entregada por el sondeo eléctrico vertical), hecho que parece realista al considerar que este sitio es un lago seco. Este hecho, podría explicar la relativamente alta conductividad entregada por el método de reflectometría al integrar la influencia de la capa húmeda que se encontraría en la profundidad.

Al igual que en la sección anterior, se debe mencionar que ambos métodos no miden en bandas de frecuencias similares, sino distintas. Por lo que una comparación directa no es adecuada,

y puede explicar las diferencias en los resultados obtenidos.

Influencia del Cable

Como se expuso en la sección anterior, las mediciones de reflectometría fueron afectadas notablemente por la curvatura del cable, al presentar ondulaciones anómalas cada ≈ 65 Mhz. Esto último afecta de forma directa al proceso de optimización de la curva medida con una simulada, forzando al algoritmo a ajustarse a una curva engañosa o simplemente encontrar una solución aparente con un amplio error. Una de las posibles explicaciones de este fenómeno, es la existencia de alguna resonancia debido a la geometría del cable curvado. Se sospecha que la calibración del VNA se realizó con el cable en una configuración mientras que la medición fue tomada en otra, una solución a este caso hubiese sido recalibrar el VNA en la misma posición del cable. A pesar de esto último, generalmente la posición del cable de RF no tiene este tipo de influencias en este tipo de mediciones, por lo que implicaría algún tipo de defecto en el cable.

Debido a la naturaleza de las mediciones y la imposibilidad de volver a tomarlas, se decidió contrarrestar este efecto tratando de replicar el mismo error en un suelo de fácil acceso, utilizando el mismo equipo, para luego sustraer la diferencia a la medición original. Sin embargo, debido a la incertidumbre del origen del error, es difícil inferir que la magnitud de este sea independiente de variables como el tipo de suelo medido, tiempo, o incluso variables atmosféricas como temperatura o humedad. A pesar de esto, el valor de 1.0 para la permitividad relativa y de 0.123 S/m para la conductividad entregado por los métodos es consistente con resultados obtenidos de forma independiente por la colaboración de MIST, por lo que el resultado entregado es el esperado.

4.3.3. Discusión general

Entre otras limitaciones que tienen estos métodos, se puede mencionar la baja resolución espacial del sitio medido. Por ejemplo, el método de Schlumberger mide a lo largo de un eje que no necesariamente puede ser representativo de toda el área circundante a la antena del radiotelescopio, pudiendo ser afectado por anomalías indeseadas bajo el suelo. Una posible solución para mejorar este método sería medir en múltiples ejes con diferentes orientaciones, de forma de poder integrar todas las contribuciones de datos y obtener un valor más representativo. El método de Reflectometría se ve incluso más afectado con esta limitación, ya que se puede considerar que solo mide en un área muy pequeña alrededor de la sonda, una solución a esto es similar a la propuesta para el método de Schlumberger.

Otro punto a considerar en esta discusión, es el algoritmo de optimización PSO, utilizado en el método de reflectometría. Este algoritmo requiere una cantidad considerable de recursos computacionales, que en cierto modo limitan la practicidad del método y por lo tanto, influyen en una decisión final a la hora de considerarlo como una opción para el proyecto MIST.

Si bien muchas veces es posible optimizar hasta lograr un umbral deseado, existe también la posibilidad de que esto no se cumpla. Estos casos pueden ser explicados por las limitaciones

del modelo 3D o del software de simulación de altas frecuencias, donde se vuelve intrincado reproducir de forma perfecta el escenario medido. Un ejemplo de esto, es la limitación del modelo de reflectometría al simular solamente una capa infinita, cuando un modelo más realista del suelo consideraría un número mayor de capas. Esto, sin duda limita el abanico de resultados posibles a elegir por el algoritmo de optimización. Durante el desarrollo de esta tesis se exploró la posibilidad de incluir más capas de suelo a la simulación, descartándose por el alto costo computacional. Por lo tanto, podemos decir que el método de reflectometría es válido hasta la profundidad que llega la línea de transmisión, es decir, 25 cm.

4.4. Resumen

En este capítulo se presentaron los resultados finales de esta investigación, donde se expusieron además los diferentes escenarios medidos y las diferentes complicaciones encontradas en cada uno. Así mismo, se describe el análisis realizado a los datos para cada método según sea el caso. Se concluye el capítulo con una discusión sobre los resultados de esta investigación, donde se busca una interpretación e implicancia de los datos. La discusión concluye con las limitaciones de ambos métodos, entregando breves recomendaciones para evitar y/o corregir posibles restricciones en futuras investigaciones, tema que será abordado en mayor profundidad en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Conclusión y Trabajo futuro

Durante el desarrollo de esta tesis, se formuló la hipótesis de que *las características del suelo afectan al rendimiento y el haz de la antena del radiotelescopio MIST* en sus observaciones de la línea de hidrógeno de 21 cm y se planteó como objetivo general la caracterización de la conductividad eléctrica y permitividad relativa en el rango 50-120 MHz, para los objetivos particulares del radiotelescopio MIST. El trabajo se dividió principalmente en dos áreas de investigación, como objetivos específicos, la medición de la conductividad y la medición de la permitividad relativa. Se exploraron diferentes métodos, sus ventajas y desventajas en la aplicación al radiotelescopio MIST. De los métodos desarrollados para lograr estos objetivos se puede concluir.

- **Medición de la conductividad:** El método de Schlumberger en conjunto con técnicas de sondeo eléctrico vertical, logró entregar información de la conductividad en una estructura de capas de tres niveles. La utilización de este método permitió incluir a la discusión la influencia de la estructura de capas del terreno sobre el desempeño del radiotelescopio MIST. El método demostró ser lo suficientemente simple y práctico, que es necesario para poder ser utilizado en los diferentes sitios remotos y aislados que MIST pueda observar. Los resultados entregados fueron los esperados para de las características de los tres terrenos medidos, según la literatura.
- **Medición de la permitividad relativa:** El método de reflectometría en dominio de frecuencia demostró ser apropiado para medir la permitividad relativa. Se logró construir una sonda y diseñar un método adecuado capaz de analizar los datos medidos y entregar un resultado consistente para una capa de espesor igual a la altura de la sonda. La forma que se analizaron los datos y su posterior resultado probó ser acertado, mas no conveniente, ya que los tiempos de computación llegaron a ser del orden de varios días o incluso semanas. Sin embargo, los resultados entregados para la permitividad relativa fueron los esperados al ser comparados con valores de la literatura.

La integración de ambos métodos fue algo donde no se lograron los resultados esperados, la medición de la conductividad entregó valores dentro del mismo orden de magnitud, pero diferentes según el método utilizado. De forma general se puede concluir que los métodos

desarrollados en esta tesis pueden ser utilizados para determinar la conductividad y permitividad relativa de los sitios donde el radiotelescopio MIST observe. Estos resultados ayudan a una caracterización que permite determinar de forma más precisa el haz de la antena, eliminando incertidumbres asociadas a las pérdidas electromagnéticas en el suelo. Esto es sin dudas necesario si se pretende medir una potencial señal global de 21 cm.

5.1. Trabajo Futuro

Este trabajo de investigación reveló diferentes caminos a ser explorados a futuro que pueden favorecer el desarrollo del radiotelescopio MIST, el estudio de la línea de 21 cm y por lo tanto la cosmología. Además de abrir caminos en el campo de la geofísica y estudio de suelos en las diferentes industrias que aprovechen estas técnicas. Entre las diferentes líneas que pueden ser abordadas se encuentran

- Exploración en profundidad del sondeo eléctrico vertical: El sondeo eléctrico vertical es una técnica muy rica en variables a utilizar, por ejemplo el arreglo de los electrodos en diferentes configuraciones geométricas, o el uso de un número mayor de electrodos pueden entregar información de la estructura de capas en tres dimensiones entre otros datos. Esto puede ser de utilidad para el radiotelescopio MIST o algún proyecto relacionado.
- Mejor optimización: El algoritmo utilizado en esta tesis se basó en Particle Swarm Optimization (PSO), que si bien demostró ser preciso, no es el más conveniente a la hora de integrarlo con los sistemas de simulación, por lo que una exploración de otros algoritmos de optimización no lineal pueden beneficiar enormemente esta línea de investigación, donde podría destacarse la inteligencia artificial. Dentro de esta línea también se puede sondear el uso de otros software de simulación electromagnética, como lo podría ser FEKO o COMSOL.
- Mejor simulación: El algoritmo de reflectometría demostró ser útil y preciso, mas no conveniente debido a los altos costos computacionales. Este algoritmo podría verse enormemente enriquecido con el uso de mayores y mejores recursos de computación, disminuyendo tiempos de procesamiento y pudiendo crear modelos más complejos, con mayor cantidad de capas o detalles del terreno.
- Variabilidad de la sonda: En esta tesis se estudió la reflectometría con una sonda bifilar, sin embargo puede ser beneficioso el estudio de otros tipos de líneas de transmisión mas sencillas de introducir en el material a medir, o incluso utilizar antenas donde no sea necesario estar en contacto con el material. La teoría dice que cualquier material dentro del campo cercano a una antena puede afectar el desempeño de ésta y por lo tanto, las reflexiones y sería posible extraer información del material como la conductividad y permitividad relativa.
- Diversificación de sitios de medición: Si bien esta investigación se enfocó en la caracterización de sitios de interés para MIST, una mayor cantidad de sitios medidos puede enriquecer el estudio y entendimiento de estos métodos.

Bibliografía

- [1] S. Malhotra y J. E. Rhoads, «The Volume Fraction of Ionized Intergalactic Gas at Redshift $z = 6.5$,» *The Astrophysical Journal*, vol. 647, n.º 2, págs. L95-L98, ago. de 2006. DOI: 10.1086/506983. dirección: <https://doi.org/10.1086/506983>.
- [2] M. Carmeli, J. G. Hartnett y F. J. Oliveira, «The Cosmic Time in Terms of the Redshift,» *Foundations of Physics Letters*, vol. 19, n.º 3, págs. 277-283, abr. de 2006. DOI: 10.1007/s10702-006-0518-3. dirección: <https://doi.org/10.1007/s10702-006-0518-3>.
- [3] S. R. Furlanetto, S. P. Oh y F. H. Briggs, «Cosmology at low frequencies: The 21cm transition and the high-redshift Universe,» *Physics Reports*, vol. 433, n.º 4-6, págs. 181-301, oct. de 2006. DOI: 10.1016/j.physrep.2006.08.002. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.08.002>.
- [4] N. Y. Gnedin y J. P. Ostriker, «Reionization of the Universe and the Early Production of Metals,» *The Astrophysical Journal*, vol. 486, n.º 2, págs. 581-598, sep. de 1997. DOI: 10.1086/304548. dirección: <https://doi.org/10.1086/304548>.
- [5] A. Cohen, A. Fialkov, R. Barkana y M. Lotem, «Charting the parameter space of the global 21-cm signal,» *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 472, n.º 2, págs. 1915-1931, ago. de 2017. DOI: 10.1093/mnras/stx2065. dirección: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2065>.
- [6] A. Fialkov, R. Barkana, D. Tseliakhovich y C. M. Hirata, «Impact of the relative motion between the dark matter and baryons on the first stars: semi-analytical modelling,» *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 424, n.º 2, págs. 1335-1345, jun. de 2012. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21318.x. dirección: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21318.x>.
- [7] M. Harwit, *Astrophysical concepts*. New York: Springer, 2006, ISBN: 0-387-32943-9.
- [8] J. R. Pritchard y A. Loeb, «21 cm cosmology in the 21st century,» *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, n.º 8, pág. 086 901, jul. de 2012. DOI: 10.1088/0034-4885/75/8/086901. dirección: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/8/086901>.
- [9] J. R. Pritchard y A. Loeb, «21-cm cosmology,» 2011. DOI: 10.48550/ARXIV.1109.6012. dirección: <https://arxiv.org/abs/1109.6012>.
- [10] R. A. Monsalve, C. Altamirano, V. Bidula y col., *Mapper of the IGM Spin Temperature (MIST): Instrument Overview*, 2023. DOI: 10.48550/ARXIV.2309.02996. dirección: <https://arxiv.org/abs/2309.02996>.

- [11] H. Hellwig, R. F. C. Vessot, M. W. Levine, P. W. Zitzewitz, D. W. Allan y D. J. Glaze, «Measurement of the Unperturbed Hydrogen Hyperfine Transition Frequency,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, n.º 4, págs. 200-209, nov. de 1970. DOI: 10.1109/tim.1970.4313902. dirección: <https://doi.org/10.1109/tim.1970.4313902>.
- [12] P. Madau, M. J. Rees, M. Volonteri, F. Haardt y S. P. Oh, «Early Reionization by Miniquasars,» *The Astrophysical Journal*, vol. 604, n.º 2, págs. 484-494, abr. de 2004. DOI: 10.1086/381935. dirección: <https://doi.org/10.1086/381935>.
- [13] P. Shaver, R. Windhorst, P. Madau y A. De Bruyn, «Can the reionization epoch be detected as a global signature in the cosmic background?» English (US), *Astronomy and Astrophysics*, vol. 345, n.º 2, págs. 380-390, dic. de 1999, ISSN: 0004-6361.
- [14] J. D. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, T. J. Mozdzen y N. Mahesh, «An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum,» *Nature*, vol. 555, n.º 7694, págs. 67-70, mar. de 2018. DOI: 10.1038/nature25792. dirección: <https://doi.org/10.1038/nature25792>.
- [15] F. Melia, «The anomalous 21-cm absorption at high redshifts,» *The European Physical Journal C*, vol. 81, n.º 3, mar. de 2021, ISSN: 1434-6052. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09029-4. dirección: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09029-4>.
- [16] R. Hills, G. Kulkarni, P. D. Meerburg y E. Puchwein, «Concerns about modelling of the EDGES data,» *Nature*, vol. 564, n.º 7736, E32-E34, dic. de 2018, ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/s41586-018-0796-5. dirección: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0796-5>.
- [17] S. Singh, J. Nambissan T., R. Subrahmanyam y col., «On the detection of a cosmic dawn signal in the radio background,» *Nature Astronomy*, vol. 6, n.º 5, págs. 607-617, feb. de 2022, ISSN: 2397-3366. DOI: 10.1038/s41550-022-01610-5. dirección: <http://dx.doi.org/10.1038/s41550-022-01610-5>.
- [18] N. Fagnoni y E. D. L. Acedo, «The “Hydrogen Epoch of Reionization Array” (HERA) — Improvement of the antenna response with a matching network and scientific impacts,» en *2016 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, IEEE, sep. de 2016. DOI: 10.1109/iceaa.2016.7731474. dirección: <https://doi.org/10.1109/iceaa.2016.7731474>.
- [19] G. Mellema, L. V. E. Koopmans, F. A. Abdalla y col., «Reionization and the Cosmic Dawn with the Square Kilometre Array,» *Experimental Astronomy*, vol. 36, n.º 1-2, págs. 235-318, abr. de 2013. DOI: 10.1007/s10686-013-9334-5. dirección: <https://doi.org/10.1007/s10686-013-9334-5>.
- [20] J. O. Burns, R. Bradley, K. Tauscher y col., «A Space-based Observational Strategy for Characterizing the First Stars and Galaxies Using the Redshifted 21 cm Global Spectrum,» *The Astrophysical Journal*, vol. 844, n.º 1, pág. 33, jul. de 2017. DOI: 10.3847/1538-4357/aa77f4. dirección: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa77f4>.
- [21] N. Mahesh, J. D. Bowman, T. J. Mozdzen y col., «Validation of the EDGES Low-band Antenna Beam Model,» *The Astronomical Journal*, vol. 162, n.º 2, pág. 38, jul. de 2021, ISSN: 1538-3881. DOI: 10.3847/1538-3881/abfdab. dirección: <http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/abfdab>.

- [22] M. Spinelli, G. Kyriakou, G. Bernardi y col., «Antenna beam characterization for the global 21-cm experiment LEDA and its impact on signal model parameter reconstruction,» *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 515, n.º 2, págs. 1580-1597, jul. de 2022, ISSN: 1365-2966. DOI: 10.1093/mnras/stac1804. dirección: <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stac1804>.
- [23] A. E. E. Rogers, J. P. Barrett, J. D. Bowman y col., «Analytic Approximations of Scattering Effects on Beam Chromaticity in 21-cm Global Experiments,» *Radio Science*, vol. 57, n.º 12, dic. de 2022, ISSN: 1944-799X. DOI: 10.1029/2022rs007558. dirección: <http://dx.doi.org/10.1029/2022RS007558>.
- [24] M. R., *MIST Global 21cm Experiment*, <http://www.physics.mcgill.ca/mist/>. dirección: <http://www.physics.mcgill.ca/mist/>.
- [25] O. A. Restrepo, F. I. Lucero, G. Chaparro y col., «Optimization of Antenna Performance for Global 21 cm Observations and Verification Using Scaled Copies,» *Journal of Astronomical Instrumentation*, jul. de 2023. DOI: 10.1142/s2251171723500058. dirección: <https://doi.org/10.1142/s2251171723500058>.
- [26] Subtel, *Cuadro de atribucion de bandas de frecuencias en Chile*, 2005. dirección: <http://bcn.cl/1w2q1>.
- [27] J. Kraus, *Electromagnetics*. New York: McGraw-Hill, 1992, ISBN: 0-07-035621-1.
- [28] C. Balanis, *Antenna theory : analysis and design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2016, ISBN: 978-1-118-64206-1.
- [29] J. B. Rhebergen, H. A. Lensen, P. B. W. Schwing, G. R. Marin y J. M. H. Hendrickx, «Soil moisture distribution around land mines and the effect on relative permittivity,» en *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII*, J. T. Broach, R. S. Harmon y G. J. Dobeck, eds., SPIE, ago. de 2002. DOI: 10.1117/12.479098. dirección: <https://doi.org/10.1117/12.479098>.
- [30] F. Wenner, «A method of measuring earth resistivity,» *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol. 12, n.º 4, pág. 469, mayo de 1916. DOI: 10.6028/bulletin.282. dirección: <https://doi.org/10.6028/bulletin.282>.
- [31] J. Reynolds, *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester, West Sussex Malden, Mass: Wiley-Blackwell, 2011, ISBN: 978-0-471-48535-3.
- [32] I. A. Adeyemo, B. T. Ojo y W. O. Raheem, «Comparison of Thickness and Depth Resolution Power of Wenner and Schlumberger Arrays: A Case Study of Temidire Quarters, Akure, Nigeria,» *Journal of Geoscience and Environment Protection*, vol. 05, n.º 03, págs. 233-239, 2017. DOI: 10.4236/gep.2017.53016. dirección: <https://doi.org/10.4236/gep.2017.53016>.
- [33] S. Stefanescu, C. Schlumberger y M. Schlumberger, «Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes,» *Journal Phys. Radium*, vol. 1, n.º 4, págs. 132-140, 1930.
- [34] E. Orellana y H. M. Mooney, *Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures; Tablas Y Curvas Patron Para Sondeos Electricos Verticales Sobre Terrenos Estratificados*. Interciencia, 1966.

- [35] O. Koefoed, *Geosounding Principles: Resistivity Sounding Measurements v. 1* (Methods in Geochemistry and Geophysics), en. London, England: Elsevier Science, oct. de 1979, pág. 276.
- [36] D. P. Ghosh, «The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements,» en, *Geophysical Prospecting*, vol. 19, n.º 2, págs. 192-217, jun. de 1971.
- [37] H. K. Johansen, «An interactive computer/graphic-display-terminal system for interpretation of resistivity soundings,» en, *Geophysical Prospecting*, vol. 23, n.º 3, págs. 449-458, sep. de 1975.
- [38] D. J. O'Neill, «Improved linear filter coefficients for application in apparent resistivity computations,» en, *Explor. Geophys.*, vol. 6, n.º 4, págs. 104-109, dic. de 1975.
- [39] V. R. Palavai, M. Subrahmanyam y D. Ratnakar, «Performance evaluation of different interpretation techniques of vertical electrical sounding data,» vol. 23, págs. 55-68, ene. de 2019.
- [40] K. T. A. Note, *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials*.
- [41] O. V. Tereshchenko, F. J. K. Buesink y F. B. J. Leferink, «An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials,» en *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, IEEE, ago. de 2011. DOI: 10.1109/ursigass.2011.6050287. dirección: <https://doi.org/10.1109/ursigass.2011.6050287>.
- [42] A. M. Nicolson y G. F. Ross, «Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, n.º 4, págs. 377-382, nov. de 1970, ISSN: 1557-9662. DOI: 10.1109/tim.1970.4313932. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>.
- [43] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, en, 4.^a ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, nov. de 2011.
- [44] S. Thomas, «Antenna System Measurements using Frequency Domain Reflectometry vs. Time Domain Reflectometry,» en *2006 IEEE Autotestcon*, IEEE, sep. de 2006. DOI: 10.1109/autest.2006.283643. dirección: <https://doi.org/10.1109/autest.2006.283643>.
- [45] J. Baker-Jarvis, *Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements*, NASA STI/Recon Technical Report N, jul. de 1990.
- [46] M. M. Alves, M. T. de Melo, L. R. G. S. L. Novo y col., «A novel iterative method to estimate the soil complex permittivity from measurement and simulation modeling,» en *2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, IEEE, ene. de 2021. DOI: 10.1109/rws50353.2021.9360397. dirección: <https://doi.org/10.1109/rws50353.2021.9360397>.
- [47] S. Grundas, ed., *Advances in Agrophysical Research*. InTech, jul. de 2013. DOI: 10.5772/3341. dirección: <https://doi.org/10.5772/3341>.
- [48] P. Savi, I. Maio e I. Stievano, «TDR response properties and their use in the estimation of soil permittivity,» en *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, IEEE, mayo de 2007. DOI: 10.1109/imtc.2007.379459. dirección: <https://doi.org/10.1109/imtc.2007.379459>.

- [49] FLUKE, *Fluke 1625-2 Ground Tester Users Manual*, English, Fluke Corporation, 2014, 12 págs., published.
- [50] M. Díaz y F. Lucero, *MIST Memo 52, Schlumberger Method*, http://www.physics.mcgill.ca/mist/memos/MIST_memo_52.pdf, [Accessed 01-12-2023], jul. de 2021.
- [51] A. N. Tikhonov, «Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method,» *Soviet Mathematics Doklady*, vol. 4, págs. 1035-1038, 1963.
- [52] G.-M. Ltd., *Guía de Usuario IPI2Win*, Available at http://geophys01.geol.msu.ru/demo_exe/WIPI_OM2.PDF, Universidad Estatal de Moscú Facultad de Geología Departamento de Geofísica, 2000.
- [53] *About NanoVNA*, https://nanovna.com/?page_id=21, Acceso: 2023-03-38.
- [54] Y. del Valle, G. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez y R. Harley, «Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 12, n.º 2, págs. 171-195, abr. de 2008. DOI: 10.1109/tevc.2007.896686. dirección: <https://doi.org/10.1109/tevc.2007.896686>.
- [55] C. Jarufe, R. Rodriguez, V. Tapia y col., «Optimized Corrugated Tapered Slot Antenna for mm-Wave Applications,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, n.º 3, págs. 1227-1235, mar. de 2018. DOI: 10.1109/tap.2018.2797534. dirección: <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2797534>.
- [56] C. G. Malmberg, «Electrical conductivity of dilute solutions of sea water from 5 to 120 C,» *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, vol. 69A, n.º 1, pág. 39, ene. de 1965. DOI: 10.6028/jres.069a.007. dirección: <https://doi.org/10.6028/jres.069a.007>.
- [57] P. Suriyapor, «1-D Vertical Electrical Sounding (VES) Inversion with a lateral constraint,» thesis, Geophysics Research Group, Department of Physics Faculty of Science, Mahidol University, jun. de 2020.

Anexo

Fórmulas para la resistividad de Wenner y Schlumberger

Comenzamos con la ley de Ohm para un punto de interés cualquiera [57]

$$\vec{E} = \rho \vec{J} = \rho \frac{I}{4\pi r^2} \hat{r},$$

donde ρ es la resistividad, r es la distancia al punto de interés desde la fuente, \vec{E} es el campo eléctrico y \vec{J} es la densidad de corriente. Si la corriente es inyectada al suelo homogéneo, el campo eléctrico penetrará al suelo en forma de hemisferio. Entonces el potencial eléctrico es

$$V(r) = \int_r^\infty E \, dr = \int_r^\infty \frac{\rho I}{2\pi r^2} \, dr,$$

resolviendo para el potencial se tiene que

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r}.$$

Con esta ecuación podremos encontrar el potencial de cualquier punto P considerando el potencial generado desde A y B, siendo este

$$V_P = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AP} - \frac{1}{PB} \right),$$

donde AP es la distancia entre el punto P y el electrodo A , y PB es la distancia entre el punto P y el electrodo B . Entonces la diferencia de potencial entre los electrodos M y N es igual a

$$V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right].$$

Entonces, la resistividad se puede calcular como

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I}K, \quad (1)$$

donde

$$K = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right]^{-1},$$

y K se define como el factor geométrico que depende de la configuración de los electrodos.

Si consideramos las distancias entre electrodos del método de Wenner, tenemos que

$$K_W = 2\pi \left[\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) \right]^{-1},$$

$$K_W = 2\pi a.$$

Entonces reemplazamos K en la ecuación 1

$$\rho_W = 2\pi a \frac{V_{MN}}{I}.$$

donde ρ_W es la resistividad aparente utilizando el método de Wenner.

De la misma forma, calculamos el factor geométrico K para el arreglo de Schlumberger

$$K_S = 2\pi \left[\left(\frac{1}{na} - \frac{1}{a(n+1)} \right) - \left(\frac{1}{a(n+1)} - \frac{1}{na} \right) \right]^{-1},$$

$$K_S = 2\pi \left[\frac{na(n+1)}{2} \right]^{-1},$$

$$K_S = \pi na(n+1).$$

Reemplazando en la ecuación 1 tenemos que

$$\rho_S = \pi na(n+1) \frac{V_{MN}}{I}.$$

donde ρ_W es la resistividad aparente utilizando el método de Schlumberger.