



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

DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS Y METODOLOGÍAS PARA MEJORAR LA  
OBSERVACIÓN DE LA LÍNEA DE 21 CM DEL HIDRÓGENO NEUTRO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

OSCAR ALBERTO RESTREPO GAITÁN

PROFESOR GUÍA:  
PATRICIO MENA MENA

PROFESORES CO-GUÍAS:  
GERMÁN CHAPARRO MOLANO  
RICARDO BUSTOS PLACENCIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RICARDO FINGER CAMUS  
LUZ GARCÍA PEÑALOZA  
ROLANDO DÜNNER PLANELLA

Finalmente se extiende el agradecimiento por el financiamiento parcial recibido por el proyecto CONICYT, Programa de Astronomía, Fondo Quimal 2018 180003 y al proyecto ANID, Fondo 2021, Quimal ASTRO21-0053 para el desarrollo de esta tesis.

SANTIAGO DE CHILE  
2023

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
GRADO DE: Doctor en Ingeniería Eléctrica  
POR: Oscar Alberto Restrepo Gaitán  
FECHA: 2023  
PROFESOR GUÍA: Patricio Mena Mena

## **DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS Y METODOLOGÍAS PARA MEJORAR LA OBSERVACIÓN DE LA LÍNEA DE 21 CM DEL HIDRÓGENO NEUTRO**

Esta tesis se enfocó en el desarrollo de herramientas, metodologías y optimización de antenas para la detección de la señal global de 21 cm, un aspecto esencial para comprender la evolución temprana del universo. Durante el estudio, se llevaron a cabo caracterizaciones de potenciales sitios en Colombia para observar la línea de 21 cm, identificando siete ubicaciones adecuadas. Estos hallazgos representan un paso muy útil en la búsqueda de entornos óptimos para la detección de esta señal. Mediante el método Particle Swarm Optimization, se lograron mejoras significativas en la optimización de antenas, alcanzando un ancho de banda óptimo entre 40 y 120 MHz, con un valor  $S_{11} < -8$  dB en toda la banda y una cromaticidad de la antena por debajo del 1%. Además, se realizaron simulaciones del cielo promedio para identificar momentos y ubicaciones estratégicas para realizar las observaciones de la línea de 21 cm. Estos resultados resaltan la importancia de seguir explorando técnicas de optimización de antenas y continuar los esfuerzos en determinar sitios adecuados de observación para la detección de la señal global de 21 cm. El enfoque en el desarrollo de instrumentos más precisos y eficientes para esta detección contribuirá al avance del entendimiento de los propios instrumentos y reducirá sus incertidumbres asociadas.

# Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en el desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, quiero agradecer al profesor Patricio, mi guía durante todo este proceso. Su dedicación, disposición y paciencia fueron invaluable para acompañarme en cada paso y orientarme hacia el éxito.

A Germán, mi compañero de trabajo, le agradezco su constante apoyo y disposición para escuchar y alentar todas mis ideas e inquietudes en relación a temas de investigación y trabajo con los estudiantes.

Al profesor Ricardo, mi mentor y asesor, le agradezco por estar siempre presente y proporcionarme las herramientas necesarias para crecer tanto en el ámbito personal como en el investigativo.

No puedo dejar de mencionar a mi esposa, Adriana, cuyo apoyo incondicional, entrega y sacrificio me han dado la energía y la motivación para continuar con este proyecto. Sin su amor y respaldo, este camino habría sido mucho más difícil.

A mis hijas, Aleja e Isabella, agradezco su alegría y vitalidad que han sido un constante impulso para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Isabella, cuya llegada inesperada llenó de felicidad nuestras vidas y nos fortaleció para enfrentar cualquier adversidad.

También quiero mencionar a mi hijo Jason, quien desde la distancia siempre ha aportado su apoyo y cariño, haciendo que su visita en Chile fuera un momento especial y significativo.

A mis estudiantes, cuyo esfuerzo, dedicación y conocimiento aportaron un granito de arena invaluable en la consecución de cada uno de los objetivos planteados en este proyecto de investigación. Su colaboración ha sido fundamental para alcanzar los resultados y avances logrados.

A mi madre, aunque no pudo estar presente en este momento especial, le dedico un profundo agradecimiento por su amor y guía a lo largo de mi vida. Su memoria siempre será un faro que ilumine mi camino.

Por último, quiero agradecer a mi padre, quien estuvo presente en Chile durante unos meses, brindándonos su apoyo y esfuerzo para dejarnos en buenas condiciones.

A todas estas personas, mi gratitud eterna por formar parte de este viaje y haber sido parte importante de esta tesis. Sus contribuciones y afecto han sido fundamentales en este logro académico y personal.

# Tabla de contenido

<b>Resumen</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>ii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación: La historia cósmica de la evolución del universo a través del estudio de la señal global de 21 cm . . . . .	1
1.2 Planteamiento del problema . . . . .	5
1.3 Hipótesis . . . . .	5
1.4 Objetivos . . . . .	6
1.4.1 Objetivo general . . . . .	6
1.4.2 Objetivos específicos . . . . .	6
1.5 Estructura de la tesis . . . . .	6
<b>2 Estado del arte</b>	<b>8</b>
2.1 Fundamentos teóricos de la señal global de 21-cm . . . . .	8
2.1.1 Ecuación de transferencia radiativa . . . . .	8
2.1.2 Temperatura de Spin . . . . .	11
2.1.3 Evolución cosmológica de la línea de 21-cm . . . . .	12
2.2 Retos en la detección de la señal global de 21-cm . . . . .	12
2.2.1 Selección y caracterización de sitios radiosilentes a bajas frecuencias . . . . .	12
2.2.2 Emisión del foregrounds (emisión sincrotrón) . . . . .	14
2.2.3 Procedimientos para la calibración de los instrumentos . . . . .	15
2.2.4 Cromaticidad presente en el patrón de radiación de las antenas. . . . .	16
2.3 Instrumentos para la detección de la línea de 21-cm . . . . .	17
2.3.1 Instrumentos compactos de baja frecuencia . . . . .	17
2.3.2 Instrumentos de una única antena . . . . .	18
2.4 Posibles tipos de antenas para la observación de la línea de 21 cm . . . . .	20
2.4.1 Antena monopolo G . . . . .	20
2.4.2 Antena monopolo tipo Blade . . . . .	22
2.4.3 Antena dipolo tipo Blade . . . . .	23
2.4.4 Antena dipolo corbatín . . . . .	24
2.5 Método de optimización para mejorar la detección de la señal de 21 cm . . . . .	25
2.6 Comentarios finales . . . . .	26

<b>3</b>	<b>Búsqueda y caracterización de sitios para la observación de línea de 21 cm del Hidrógeno en Colombia</b>	<b>27</b>
3.1	Selección de sitios . . . . .	27
3.1.1	Por densidad poblacional . . . . .	28
3.1.2	Por ocupación del espectro radioeléctrico en la banda del FM . . . . .	29
3.1.3	Por precipitación . . . . .	35
3.1.4	Selección final de sitios adecuados . . . . .	37
3.2	Caracterización de las propiedades físicas del suelo en un sitio conocido previamente	38
3.2.1	Descripción del sitio seleccionado . . . . .	38
3.2.2	Experimento . . . . .	39
3.2.3	Resultados y discusión . . . . .	41
3.3	Comentarios finales . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Desarrollo y caracterización de antenas apropiadas para la observación de la línea de 21 cm del Hidrógeno</b>	<b>44</b>
4.1	Método de optimización utilizado PSO . . . . .	45
4.1.1	Velocidad y actualización de la partícula . . . . .	47
4.1.2	Selección de los hiperparámetros . . . . .	48
4.2	Creación de un script en Python y HFSS para la implementación del proceso de optimización . . . . .	49
4.2.1	Implementación de PSO . . . . .	53
4.2.2	Definición de los parámetros . . . . .	53
4.3	Validación del método . . . . .	54
4.3.1	Resultados del proceso de optimización . . . . .	55
4.4	Requerimientos para el diseño de la antena y del proceso de optimización . . . . .	57
4.4.1	Banda de operación de la antena . . . . .	57
4.4.2	Parámetro $S_{11}$ . . . . .	57
4.4.3	Ancho de haz a media potencia . . . . .	58
4.4.4	Cromaticidad de la antena . . . . .	58
4.5	Función de mérito . . . . .	58
4.6	Estudio de antenas seleccionadas . . . . .	59
4.6.1	Implementación de las antenas . . . . .	63
4.6.2	Montaje experimental y mediciones . . . . .	64
4.7	Comentarios finales . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Modelamiento del cielo y del patrón de radiación para la observación de la línea de 21 cm del Hidrógeno</b>	<b>72</b>
5.1	Simulación del cielo a bajas frecuencias . . . . .	72
5.2	Simulación del haz de la antena . . . . .	74
5.3	Simulación del espectro dinámico del cielo con patrones de radiación de antenas seleccionadas . . . . .	75
5.4	Comparación del desempeño de antenas usando simulaciones del cielo . . . . .	78
5.4.1	Antena isotrópica . . . . .	78

5.4.2	Antenas original, optimizada y corbatín . . . . .	80
5.5	Comentarios finales . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>85</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	85
6.2	Trabajo Futuro . . . . .	86
	<b>Bibliografía</b>	<b>87</b>

# Índice de Figuras

1.1	La señal de 21 cm a través del tiempo. Panel superior: Estructura espacial del brillo de 21 cm desde el momento justo antes de que se formaran las primeras estrellas hasta el final de la época de reionización. Panel inferior: Evolución esperada de la temperatura de brillo de la línea de 21 cm promediada en el cielo, en función de la frecuencia y el desplazamiento al rojo. Se puede ver momentos de ascenso y descenso a partir del contraste entre la temperatura de la CMB y la temperatura de giro a través de distintos periodos cosmológicos. Tomada de [3].	2
2.1	Comparación de la señal de 21 cm con varios foregrounds. Se muestra la contribución de la Galaxia para una región del cielo lejos del centro galáctico; la señal reflejada muestra la magnitud de esta emisión después de ser reflejada por la Luna y recibida a través del lóbulo trasero de la antena, lo que suprime su contribución relativa. La radiación térmica de la Luna también se ve suprimida al ingresar a través del lóbulo trasero. La Galaxia y el Sol opacan la señal de 21 cm (representada por una línea sólida roja cuando está en emisión y una línea punteada roja para la absorción). La curva sólida azul muestra el ruido térmico para 1000 horas de integración, mientras que la curva punteada azul muestra esto con la adición de un residual de 1 mK. El espectro de ruido causado por impactos de polvo es despreciable [59].	14
2.2	Fotografía de una de las 32 antenas MWA actualmente desplegadas. El plano tierra de formado por la malla de alambre de $5 \times 5$ metros está colocado directamente sobre el suelo y las antenas dipolo se sujetan a la malla [28].	18
2.3	Fotografía de una “base” de antena activa de LWA. Consiste de dos antenas dipolo tipo bowtie alineadas ortogonalmente en un mástil, sobre una pantalla de tierra metálico de $3 \times 3$ m [29].	18
2.4	Fotografía de una de las antenas de PAPER en el Desierto de Karoo en Sudáfrica.	19
2.5	Esquema estructural de una antena monopolo tipo G.	21
2.6	Patrón de radiación de una antena tipo G. En este caso, la dirección del eje z representa el cenit, y se puede observar que la antena alcanza su máxima ganancia en esa dirección.	22
2.7	Esquema antena monopolo blade.	23
2.8	Relación de onda estacionaria simulada para la antena monopolo tipo blade.	23
2.9	Esquema antena dipolo Blade.	24
2.10	Esquema antena dipolo corbatín.	25

3.1	Distribución geográfica de los 32 departamentos de Colombia. . . . .	28
3.2	Municipios de Colombia con baja densidad poblacional. . . . .	29
3.3	Antenas de emisoras FM instaladas en Colombia [51]. . . . .	31
3.4	Rango de cubrimiento de la emisora RCN. Frecuencia de operación 93.9 MHz y potencia de su antena de 25 kW. . . . .	32
3.5	Zonas con niveles de RFI nulos y/o menores a $-50$ dBm. . . . .	33
3.6	Municipio de Uribia con un rango de 50 km libres de señales de radio FM [51]. . . . .	33
3.7	Precipitación en las áreas seleccionadas con bajo nivel de RFI. . . . .	37
3.8	Arreglo método de Schlumberger. . . . .	40
3.9	Montaje experimental para mediciones de resistividad in-situ. . . . .	41
3.10	Perfil del suelo distribuido en capas. Cada profundidad de las capas es resultado del proceso de interpretación usando IPI2WIN. . . . .	42
3.11	Curva de resistividades obtenida en campo para el sondeo 1. . . . .	43
3.12	Curva de resistividades obtenida en campo para el sondeo 2. . . . .	43
4.1	Esquemático antena dipolo blade. . . . .	50
4.2	Diagrama de flujo del sub-proceso de optimización. . . . .	51
4.3	Diagrama de flujo del proceso de optimización. . . . .	52
4.4	Dispersión del patrón de radiación de la antena en el rango de frecuencias de 100–200 MHz antes del proceso de optimización. a) plano $\phi = 90^\circ$ . b) plano $\phi = 0^\circ$ . . . . .	56
4.5	Dispersión del patrón de radiación de la antena en el rango de frecuencias de 100–200 MHz después del proceso de optimización. a) plano $\phi = 90^\circ$ . b) plano $\phi = 0^\circ$ . . . . .	57
4.6	Esquemático de las antenas blade y corbatín. . . . .	60
4.7	Parámetro $S_{11}$ para las antenas blade y corbatín en la banda de 40 - 120 MHz. . . . .	61
4.8	Patrones de radiación originales (a, c) y optimizados (b, d) para las antenas blade y corbatín. La ganancia se muestra en una escala lineal. El plano $\phi = 90^\circ$ corresponde a cortes a lo largo del eje de excitación de las antenas dipolo blade y corbatín (plano E). El plano $\phi = 0^\circ$ corresponde a cortes a lo largo del eje perpendicular (plano H). . . . .	62
4.9	Prototipos antenas escaladas. a) antena tipo blade. b) antena tipo corbatín. . . . .	64
4.10	Comparación entre mediciones y simulaciones del parámetro $S_{11}$ para antenas original, optimizada blade y corbatín. . . . .	65
4.11	Patrones de radiación simulados y medidos de los tres prototipos de antenas escaladas. . . . .	66
4.12	Mapas de radiación simulada y medida en función de la frecuencia (eje $y$ ) y el ángulo cenital $\theta$ (eje $x$ ) para las tres antenas a escala. Plano $\phi = 90^\circ$ . . . . .	67
4.13	Mapas de radiación simulada y medida en función de la frecuencia (eje $y$ ) y el ángulo cenital $\theta$ (eje $x$ ) para las tres antenas a escala. Plano $\phi = 0^\circ$ . . . . .	68
4.14	Gráfico de color para la derivada de la ganancia simulada y medida en función de la frecuencia (eje $y$ ) y el ángulo cenital $\theta$ (eje $x$ ) para las tres antenas. El $RMS_{NBC}$ se calcula para todo el ancho de banda en el plano $\phi = 90^\circ$ . . . . .	69

4.15	Gráfico de color para la derivada de la ganancia simulada y medida en función de la frecuencia (eje $y$ ) y el ángulo cenital $\theta$ (eje $x$ ) para las tres antenas. El $RMS_{NBC}$ se calcula para todo el ancho de banda en el plano $\phi = 0$ . . . . .	70
5.1	Simulación del cielo observado a 100 MHz, extrapolado del mapa de Haslam a 408 MHz, en coordenadas galácticas $l$ y $b$ . . . . .	73
5.2	Ancho del haz de las antenas a mitad de potencia (HPBW, por sus siglas en ingles) simulado a 100 MHz. . . . .	75
5.3	Simulación de la temperatura del cielo utilizando el Mapa de Haslam para el día (14 de junio de 2021) en la ubicación del municipio de Uribia (11.9144° N, -71.9991° O) a las 05:00 UTC (a) y 16:00 UTC (b). . . . .	76
5.4	Longitud galáctica del cenit para el día (2021-06-14) en las ubicaciones del municipio de Uribia (11.9144° N, -71.9991° O) y EDGES (26.70° S, 116.67° E). Sombramos con gris las longitudes válidas para las observaciones cuando vemos principalmente un cielo sin estructura. . . . .	78
5.5	Simulación de la temperatura del cielo para las 05:00 UTC con 0 grados de longitud galáctica en el cenit (a) y las 16:00 UTC con 224 grados en el cenit (b). Ambas simulaciones se realizaron para el día (2021-06-14) en la ubicación del municipio de Uribia (11.9144° N, -71.9991° O). Se representan los patrones de radiación de las antenas optimizada (verde marino), corbatín (verde) y original (azul). . . . .	79
5.6	a) Espectros dinámicos simulados para la antena isotrópica y acromática. La barra de colores muestra la temperatura de la antena, que varía según la hora del día (2021-06-14) y su relación con la longitud galáctica del cenit. La línea punteada naranja, marca la hora en que el punto de longitud cero está en el cenit y el cuadro gris encierra el período de tiempo en el que sería mejor realizar las observaciones, con longitudes galácticas entre 90 y 270 grados. b) Espectros individuales para momentos distintos del mismo día. La línea punteada naranja marca los espectros para cuando el punto de longitud cero está en el cenit (5:00 UTC). La línea blanca señala el espectro mínimo para ese día (16:00 UTC). . . . .	79
5.7	Espectros dinámicos simulados para las antenas optimizada, corbatín y original. Las marcas son las mismas que en la Figura 5.6. La antena original se modeló en la ubicación del proyecto EDGES (26.70 S, 116.67 E), mientras que optimizada y corbatín se simularon en la ubicación del municipio de Uribia. . . . .	80
5.8	a) Espectros dinámicos simulados para la antena optimizada. b) Cortes de espectros para diferentes momentos del día. Los espectros con mayor opacidad son los que se encuentran dentro de los tiempos de interés cuando se tienen longitudes entre 90 y 270 grados en el cenit. . . . .	81
5.9	a) Espectros promediados para las longitudes galácticas deseadas entre 90 y 270 grados, para las antenas optimizada, corbatín y original. b) Residuos de la temperatura respecto al espectro isotrópico ideal. . . . .	82

5.10 Derivada de los residuos de la antena isotr3pica, acrom3tica en t3rminos de la frecuencia y de las antenas optimizada, corbat3n y original. Para resaltar m3s estos resultados, se realiza un zoom en las frecuencias entre 70 y 120 MHz, donde se ha reportado la primera detecci3n de la se1al de 21 cm. . . . . 83

# Índice de Tablas

2.1	Comparación de los diseños de antenas utilizados en diversos experimentos para la observación de la EoR. . . . .	20
3.1	Potencia de operación de la antena según la clase de la emisora. . . . .	30
3.2	Municipios en Colombia con posible baja interferencia RFI. . . . .	34
3.3	Ranking de los lugares ideales encontrados para la implementación de un radiotelescopio a baja frecuencia en Colombia . . . . .	38
4.1	Hiperparámetros usados para la implementación de PSO. . . . .	54
4.2	Dimensiones físicas de las antenas blade y corbatín originales y optimizadas. Todas las antenas tienen un plano tierra de 5 m × 5 m. . . . .	60
4.3	Resultados del proceso de optimización para los parámetros ancho de banda y cromaticidad de las antenas blade y corbatín originales y optimizadas. . . . .	63
4.4	Parámetro de cromaticidad del haz simulado y medido para las tres antenas. . .	71
5.1	Desviación estándar de la derivada de los residuos de temperatura de las antenas optimizada, corbatín y original respecto del modelo ideal isotrópico. . . . .	83

# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se presenta la motivación, descripción y la detección de la línea de 21-cm en la época del amanecer cósmico con el fin de conocer la evolución del universo en épocas tempranas. Además se incluye una reseña de los retos que se presentan hoy día para la detección de la señal global de 21-cm y su comprensión científica. A partir de estos retos se ha seleccionado el proceso de optimización y mejora de los parámetros electromagnéticos como motivación para el planteamiento de esta investigación. Asimismo, se presentan el planteamiento del problema, las hipótesis y los objetivos desarrollados en esta tesis. Finalmente, se describe la estructura de esta tesis.

### 1.1 Motivación: La historia cósmica de la evolución del universo a través del estudio de la señal global de 21 cm

En nuestra comprensión actual de la formación del Universo, las diminutas fluctuaciones de densidad que observamos en la radiación de fondo cósmico de microondas (CMB) crecieron a través de la inestabilidad gravitatoria hasta que colapsaron en la “red cósmica” de láminas, filamentos y halos que vemos en el Universo local [1]. Este esquema ha tenido un éxito extraordinario para explicar las observaciones tanto del Universo temprano como de las estructuras locales. Sin embargo, hay lagunas significativas que siguen sin observarse en la evolución del universo primitivo: la transición entre la “Época Oscura” cósmica entre la última fase de dispersión de la CMB y la formación de las primeras estructuras luminosas (amanecer cósmico) y también el paso por la Época de Reionización (EoR) que se extiende desde la formación de estas fuentes hasta la reionización completa del Medio Intergaláctico (IGM). La observación de la línea de longitud de onda de 21 cm del gas hidrógeno neutro ( $\nu = 1420.4$  MHz,  $z = 0$ ) permite conocer estas etapas evolutivas del universo temprano (Ver figura 1.1)[2, 3].

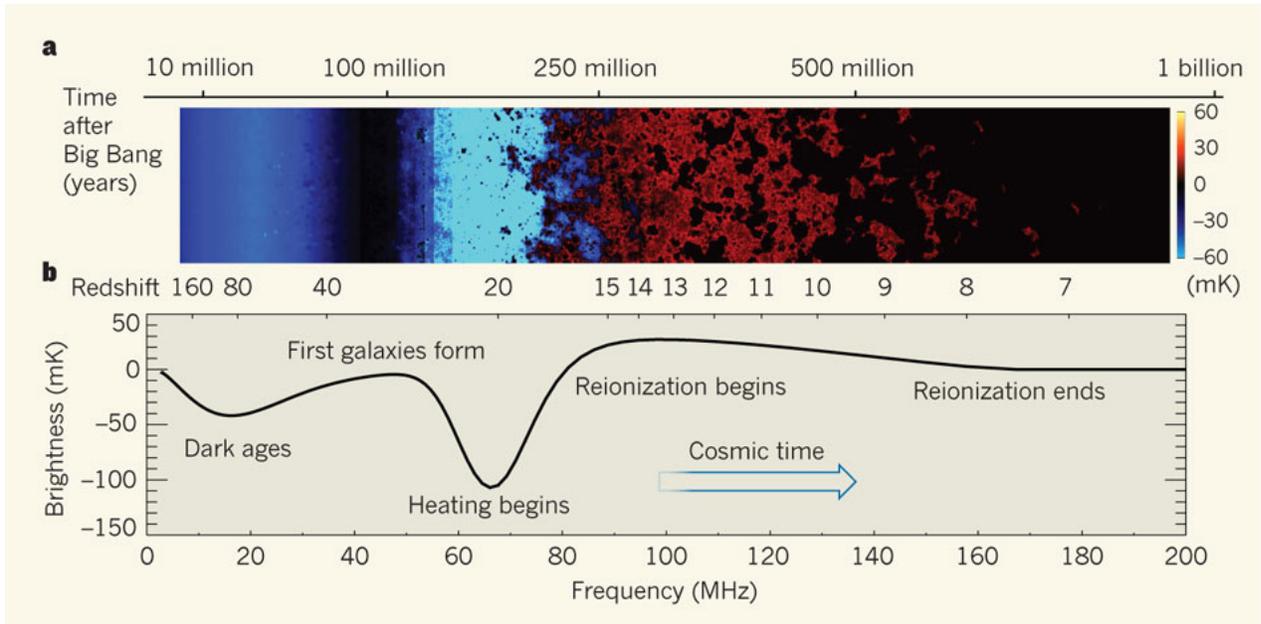


Figura 1.1: La señal de 21 cm a través del tiempo. Panel superior: Estructura espacial del brillo de 21 cm desde el momento justo antes de que se formaran las primeras estrellas hasta el final de la época de reionización. Panel inferior: Evolución esperada de la temperatura de brillo de la línea de 21 cm promediada en el cielo, en función de la frecuencia y el desplazamiento al rojo. Se puede ver momentos de ascenso y descenso a partir del contraste entre la temperatura de la CMB y la temperatura de giro a través de distintos periodos cosmológicos. Tomada de [3].

En la teoría clásica, el movimiento del electrón que orbita alrededor del protón en un átomo de Hidrógeno neutro (HI) es el responsable de generar un campo magnético que acopla los espines del protón y del electrón. Este acople da cuenta de la radiación a 1420 MHz que viene de la transición entre los dos niveles 1s del estado fundamental del hidrógeno, que se dividen ligeramente por la interacción entre el espín del electrón y el espín nuclear dando cabida a la conocida transición hiperfina del hidrógeno. La radiación de 21 cm puede utilizarse para medir efectos de la línea hiperfina del gas hidrógeno neutro. Debido a la expansión del Universo, se desplaza al rojo a frecuencias de observación más bajas dadas por

$$\nu = \frac{1420}{(1+z)} (MHz), \quad (1.1)$$

donde  $\nu$  es la frecuencia y  $z$  el corrimiento al rojo (redshift). Es importante destacar que esta relación frecuencia-desplazamiento al rojo permite una reconstrucción directa de la evolución del Universo en función del tiempo a partir del espectro de la línea de 21 cm. Estas épocas constituyen la frontera de la cosmología observacional hoy día.

La cosmología observacional es una herramienta sólida para poner a prueba algunos de los

modelos teóricos del Universo temprano. La luz de los primeros objetos luminosos se desplazó al rojo, y ahora deberíamos poder observar algunas de sus características en radiofrecuencias bajas. Este desplazamiento permitió una transición hiperfina del hidrógeno neutro, dando lugar a la línea espectral de 21 cm. La caracterización de esta señal tiene el potencial de desarrollar nuestra comprensión de la evolución del Universo. Aunque hasta el momento existen muy pocas observaciones directas de la emisión de 21 cm a escalas cosmológicas, numerosos modelos teóricos coinciden en que la más probable evolución del universo sigue los siguientes pasos:

- A alto corrimiento al rojo ( $z \sim 100$ ,  $\nu \sim 10$  MHz), la densidad del medio intergaláctico es alta, y se producen numerosas colisiones atómicas. Estas colisiones enfrían el gas adiabáticamente, haciendo que su temperatura esté por debajo de la temperatura de los fotones de la CMB, por lo que se espera observar la línea de 21 cm en absorción en este momento.
- La expansión del Universo hace que las colisiones atómicas sean menos frecuentes, lo que permite al HI alcanzar el equilibrio térmico con los fotones del CMB. En este momento ( $z \sim 35$ ,  $\nu \sim 50$  MHz) desaparece la señal global de 21 cm al no haber absorción o emisión respecto al CMB.
- Posteriormente, el colapso gravitacional en las regiones más densas del universo hace que comiencen a formarse los primeros objetos astrofísicos, estrellas y, más tarde, galaxias. Este momento se conoce como amanecer cósmico. La emisión de fondo en Lyman- $\alpha$  reconecta la temperatura del HI con la de la IGM, por lo que se espera una fuerte señal de 21 cm en absorción en  $z \sim 20$ ,  $\nu \sim 70$  MHz.
- La radiación a altas frecuencias (principalmente rayos X) causada por la emisión de estas primeras fuentes acaba calentando el gas por encima de la temperatura del CMB, de modo que se observa la señal de 21 cm en emisión ( $z \sim 15$ ,  $\nu \sim 90$  MHz).
- A medida que se crean más y más galaxias, la radiación ultravioleta acaba ionizando la mayor parte del gas, de modo que, tras el momento de la reionización ( $z \sim 6$ ,  $\nu \sim 200$  MHz), la amplitud de la señal global de 21 cm disminuye significativamente.

Una de las posibles formas de detectar cada una de estas características es promediando la señal global de radiofrecuencia para cada dirección angular y producir un espectro del cielo promediado. Este procedimiento nos daría información sobre la temperatura de brillo media de la línea de 21 cm acoplada a su desplazamiento al rojo, con un corrimiento  $z \gg 6$ , en las épocas de interés. Se han hecho varios intentos para detectar la señal con este método, con el primer resultado obtenido por el Experimento para Detectar la Firma Global de la Época de Reionización (EDGES) [4]. Sin embargo, estos resultados han sido cuestionados [5], debido a dificultades en el instrumento y en la cosmología observacional en estas frecuencias. Por ejemplo, la radiación sincrotrón de las galaxias domina la señal del cielo hasta 5 órdenes de magnitud por encima de la intensidad esperada para la línea de 21 cm. Además, los efectos cromáticos de la antena de EDGES y la ionósfera pueden proporcionar contaminación espectral no deseada. También se deben tener en cuenta los problemas que se presenta a la hora de calibrar estos

instrumentos ya que deben tener una sensibilidad muy alta para poder revelar la señal de 21 cm del espectro de la radiación sincrotrón. Este último, quizás sea el reto observacional más importante ya que la estabilidad de la respuesta de los sistemas a lo largo de varios días de tiempo de integración debe ser permanente. Finalmente, el ruido que puede ser introducido por señales producidas por el hombre como emisoras en la banda del FM, satélites artificiales, líneas de transmisión y televisión debe ser mitigado ya que estos tienen potencias muy altas que hacen que los receptores dedicados a la observación de la línea de 21 cm se saturen. De esta manera, un análisis preciso a partir de datos de prueba resulta esencial, incluso antes de realizar observaciones para la detección de estas señales.

El problema presente en la cromaticidad de las antenas dedicadas a la observación de la línea de 21 cm, es parte de la motivación de esta tesis. Hay diferentes tipos de geometrías de antenas que vienen siendo estudiadas, analizadas y usadas por diferentes experimentos al rededor del mundo. El experimento EDGES, utiliza una antena dipolo tipo Blade que se caracteriza por estar compuesta de dos paneles metálicos ubicados a cierta altura respecto a un plano tierra. El experimento Shaped Antenna measurement of the background RAdio Spectrum (SARA) [6] utilizó una antena monopolo esférica que ha evolucionado a una antena monopolo cónica [7]. Broadband Instrument for Global HydrOgen ReioNisation Signal (BIGHORNS) empleó una antena bicónica y una cónica espiral logarítmica [8]. Por otro lado, la “Sonda Cosmológica de las Islas para la Detección de Hidrógeno Neutro” (SCI-HI) implementó una antena de cuatro puntos modificada de tal manera que su geometría cambio a una parecida a la flor conocida como Hibiscus nombre con el cual fue llamada esta antena [9]. Esto muestra que es posible implementar diferentes tipos de geometrías para la detección de la señal de 21 cm. Sin embargo, hace falta alcanzar las características óptimas, como baja dependencia de la ganancia de la antena con la frecuencia y el ángulo cenital, para tener una mejor certeza de su comportamiento y de su rendimiento deseado.

Por otro lado, para iniciar cualquier observación en radioastronomía, es importante identificar y analizar cuidadosamente todas las interferencias de radiofrecuencia (RFI) posibles en las ventanas de observación seleccionadas. Esto es importante porque la RFI perturba significativamente las señales que fueron emitidas en el Universo temprano que generalmente son muy débiles. Estas señales, como se mencionó anteriormente, están en la banda del VHF donde cada vez el espectro radioeléctrico está más contaminado por interferencias de radiofrecuencias generadas por humanos, intencionales y no intencionales. Este RFI se produce en áreas residenciales y comerciales con gran densidad poblacional. La RFI es generada por actividades humanas esenciales como el acceso inalámbrico a Internet, satélites (GPS, GLONASS, ORB-COMM e IRIDIUM), televisores, teléfonos móviles y otros equipos eléctricos personales básicos como computadoras portátiles, radios, calentadores eléctricos y aspiradoras. También existe infraestructura básica que genera RFI como vehículos de transporte, líneas eléctricas y centrales eléctricas. Todas estas señales tienen potencias muy elevadas que pueden saturar los instrumentos de detección de la señal de 21 cm y no permitir que se pueda realizar la observación y/o introducir ruido que no esté completamente entendido y modelado que genere incertidumbres al medir la señal de 21 cm. Es por ello que se hace importante cuantificar los efectos de dicha RFI

en el espectro utilizado en radioastronomía de bajas frecuencias, instalando estos instrumentos en sitios aislados y remotos, donde los niveles de RFI sean extremadamente bajos.

## 1.2 Planteamiento del problema

Durante el desarrollo de diferentes experimentos para la detección de la señal de 21 cm se han encontrado desafíos por superar con el propósito de mejorar la confiabilidad de los instrumentos y tener la sensibilidad suficiente para observar este tipo de señales. Se hace necesario avanzar en nuestro entendimiento de cada una de las fases que se ejecutan en la observación de este fenómeno. Para nuestro caso, el principal reto está en el diseño del radiómetro por dos razones. En primer lugar, la antena dedicada para la observación de la línea de 21 cm puede acoplar la estructura del cielo en modos espectrales. En segundo lugar, la antena y el receptor modifican la forma de la señal incidente del cielo mediante una respuesta en frecuencia que se manifiesta tanto como una ganancia multiplicativa como por componentes aditivos. Estos efectos introducen ruido no deseados en las observaciones.

La antena es uno de los subsistemas críticos de todo el radiómetro. El modelado de la antena se realiza a partir de las simulaciones. Así pues, cualquier diseño simulado de la antena debe probarse adecuadamente antes de su despliegue. Las diversas propiedades de la antena que afectan las mediciones, por ejemplo, el patrón de radiación, la reflexión y las eficiencias totales, varían en toda la banda y requieren de un esfuerzo y cuidados considerables para medirlas con la precisión necesaria y así modelar sus efectos en los datos. Por lo tanto es crucial prestar mucha atención al diseño de la antena y asegurarse de que sus características no limiten la detección de la señal de 21 cm. Por lo anterior, es posible diseñar una antena con las características necesarias para ser implementada en un radiotelescopio de bajas frecuencias para observar la señal de 21 cm y así obtener información necesaria para comprender las etapas evolutivas del universo temprano.

## 1.3 Hipótesis

- Es posible diseñar, analizar, optimizar, construir y caracterizar una antena para formar parte de un instrumento que pueda medir la señal de 21 cm a partir del estudio de diferentes geometrías de antenas que como mínimo tengan el rendimiento de las actuales para confirmar o descartar la detección de la señal mostrada por el grupo EDGES.
- A partir del estudio de variables meteorológicas como: temperatura, precipitación, brillo solar y humedad relativa, y el análisis de simulaciones de RFI obtenidas de la Agencia Nacional Espectro (ANE) es posible seleccionar sitios adecuados para el despliegue de un radiotelescopio a bajas frecuencias.
- Simulando la temperatura media del cielo podremos comprender cómo cambia a lo largo del día y comparar el rendimiento de cada antena en función de su cromaticidad.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta propuesta es desarrollar herramientas y metodologías para la observación adecuada de la línea de hidrógeno neutro de 21 cm.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos se describen a continuación:

- Identificar sitios potenciales con baja interferencia de radiofrecuencia (RFI) en Colombia para el despliegue de un futuro radiotelescopio de baja frecuencia.
- Diseñar, analizar y caracterizar una antena para ser utilizada en el futuro radiotelescopio MIST en la banda de frecuencias de 40 - 120 MHz con las siguientes características
  - $S_{11} < -8$  dB para toda la banda.
  - Ancho de haz a media potencia (HPBW) entre  $30^\circ < \text{HPBW} < 60^\circ$  (para todas las frecuencias) y “apuntamiento hacia el cenit”.
  - Un comportamiento suave en el cambio de la ganancia de la antena en el rango de frecuencias deseado. Este comportamiento conocido como cromaticidad de la antena debe estar por debajo de 1% (por MHz).
- Realizar simulaciones de la temperatura media del cielo que puedan servir de apoyo para la detección de la señal de 21 cm. El modelo debe construir un cielo sintético y convolucionarlo con los patrones de haz de varias antenas.

## 1.5 Estructura de la tesis

Los diferentes capítulos de esta tesis contribuyen al desarrollo y comprensión general del estudio de la señal global de 21 cm. En el Capítulo 1, se establecen la motivación, el planteamiento del problema, las hipótesis y los objetivos de la investigación. Esta discusión sienta las bases para abordar el tema central de la tesis. El Capítulo 2 se enfoca en el estado del arte y la revisión bibliográfica sobre la señal global de 21 cm. Aquí se presentan los fundamentos teóricos, los retos en la detección de la señal, los instrumentos utilizados y los tipos de antenas que se consideran relevantes para la observación. Luego, en el Capítulo 3, se describe el proceso de búsqueda y caracterización de sitios para la observación de la línea de 21 cm en Colombia. Los criterios de selección de sitios, basados en densidad poblacional, ocupación del espectro radioeléctrico y precipitaciones, están relacionados con el objetivo general de encontrar condiciones favorables para el funcionamiento del radiotelescopio. El Capítulo 4 se centra en el desarrollo y caracterización

de antenas apropiadas para la observación de la señal. Aquí, el método de optimización Particle Swarm Optimization (PSO) se conecta con el objetivo de mejorar la detección de la señal y se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones y mediciones. En el Capítulo 5, se profundiza en la caracterización de antenas a través de simulaciones del cielo y el modelado del patrón de radiación. Las comparaciones con un modelo de antena isotrópica ayudan a entender la eficiencia de las antenas seleccionadas. Finalmente, en el Capítulo 6, se realiza un resumen general de los resultados y se presentan las conclusiones finales del estudio. Las recomendaciones y líneas futuras de investigación abren el camino para continuar avanzando en el conocimiento sobre la señal global de 21 cm y su importancia en la evolución del universo.

# Capítulo 2

## Estado del arte

El presente capítulo se centra en el estado actual de la investigación y la revisión bibliográfica de la señal global de 21 cm. Además, se abordan los fundamentos teóricos esenciales para comprender la naturaleza y la evolución cosmológica de esta señal. En la sección 2.1, se presentan los fundamentos teóricos de la señal global de 21 cm, abordando aspectos como la ecuación de transferencia radiativa y la temperatura de Spin. Además, se explora la evolución cosmológica de la línea de 21 cm y su relevancia en la comprensión del Universo temprano. La sección 2.2 se centra en los desafíos asociados a la detección de la señal global de 21 cm. Se discuten temas como la selección y caracterización de sitios con baja interferencia de radiofrecuencia, la emisión del primer plano y los procedimientos de calibración de los instrumentos. También se aborda la cromaticidad presente en el patrón de radiación de las antenas. En la sección 2.3, se realiza una descripción de los instrumentos utilizados para la detección de la línea de 21 cm. Se exploran los instrumentos compactos de baja frecuencia para la observación de la reionización del universo (EoR, por sus siglas en inglés) y las observaciones de EoR con instrumentos de una única antena. Por otro lado, sección 2.4 analiza los posibles tipos de antenas utilizadas en la observación de la línea de 21 cm. Se examinan la antena monopolo G y tipo Blade además de las antenas dipolo tipo Blade y corbatín, considerando sus características y aplicaciones potenciales. Finalmente, en la sección 2.5 se abordan los procesos de optimización utilizados en el diseño de antenas. Se discuten los antecedentes teóricos, las estrategias probabilísticas, las estrategias heurísticas y metaheurísticas, así como las estrategias basadas en la población.

## 2.1 Fundamentos teóricos de la señal global de 21-cm

### 2.1.1 Ecuación de transferencia radiativa

La radiación cósmica de fondo (CMB) es una radiación de microondas que se detecta en todas las direcciones del espacio. Es el remanente del Big Bang y proporciona información valiosa sobre las condiciones iniciales y la evolución del universo. Los fotones de la CMB interactúan con el hidrógeno neutro e introducen características de la CMB en el rango de frecuencias muy bajas ( $1 \sim 200$ ) MHz, que se ajusta bien al espectro de radiación del cuerpo negro [10]. Estas características surgen de las transiciones de espín del hidrógeno neutro entre el estado básico y

el primer estado excitado. Para cuantificar cuántas partículas hay en el estado excitado ( $n_1$ ) en comparación con el estado base ( $n_0$ ), se define la temperatura de espín  $T_s$  mediante la relación [2][3][11],

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} e^{(-T_*/T_s)} = 3e^{(-T_*/T_s)}, \quad (2.1)$$

donde  $T_* \equiv hc/\lambda_{21cm} = E_{10}/k_B = 0.068$  K.  $g_1$  y  $g_0$  son los pesos estadísticos para los estados excitado y base respectivamente.  $E_{10}$  es la energía de separación entre estos dos estados.  $\lambda_{21cm}$  representa la longitud de onda de emisión de la línea de 21 cm y  $k_B$  la constante de Boltzman. Ahora, considerando la interacción física de las temperaturas  $T_*$  y  $T_s$  con las nubes de hidrógeno y aplicando los principios de transferencia de radiación se llega a una forma final de la temperatura de espín en función del desplazamiento al rojo. Suponiendo que la temperatura de la CMB,  $T_\gamma$ , tiene una distribución de cuerpo negro su intensidad es

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T_\gamma} - 1}, \quad (2.2)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $h$  la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia. Ahora, definiendo  $S_\nu$  como la potencia radiada por un cuerpo negro,

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{T_*/T_s} - 1}, \quad (2.3)$$

entonces es posible escribir la ecuación de transferencia radiativa como

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu, \quad (2.4)$$

donde  $\tau_\nu$  representa la profundidad óptica de la nube de hidrógeno, una cantidad que define la transparencia del medio a tales radiaciones a estas frecuencias dadas. Si consideramos que la temperatura de brillo,  $T_b$ , puede cuantificar  $I_\nu$  como la temperatura necesaria para que un objeto irradie como un cuerpo negro (con espectro  $B_\nu$ ), es decir,  $I_\nu = B_\nu T_b$ , especialmente para frecuencias bajas y altas temperaturas ( $h\nu \ll KT$ , en el límite de Rayleigh-Jeans), entonces podemos utilizar la aproximación de la temperatura de brillo ( $T_b \approx \frac{I_\nu c^2}{2k_B \nu^2}$ ) para expresar  $I_\nu$  y  $S_\nu$  como

$$I_\nu = \frac{2k_B}{\lambda_{21cm}^2} T_b, \quad (2.5)$$

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{T_s}{T_*} = \frac{2k_B T_s}{\lambda_{21cm}^2}, \quad (2.6)$$

Estas ecuaciones permiten reescribir la ecuación de transferencia en términos de la temperatura de brillo y la temperatura de la radiación cósmica de fondo,

$$\frac{dT_b}{d\tau_\nu(\nu)} = -T_b + T_\gamma. \quad (2.7)$$

Resolviendo 2.7 se obtiene la temperatura de brillo a una frecuencia  $\nu$

$$T_b(\nu) = T_s(1 - e^{-\tau_\nu}) + T_\gamma(\nu)e^{-\tau_\nu}, \quad (2.8)$$

En el contexto de la detección de la señal global de 21 cm, la cantidad de interés es la temperatura de brillo diferencial ( $\delta T_b \equiv T_b - T_\gamma$ ) [2][12], la diferencia entre la temperatura de brillo y la temperatura de la CMB, teniendo en cuenta el corrimiento al rojo  $z$ . Esta relación refleja el hecho de que la única medida de temperatura de brillo significativa en lo que respecta al medio intergaláctico (IGM) es cuando difiere de la  $T_\gamma$ . Esta relación se expresa como

$$\delta T_b = \frac{T_s - T_\gamma(z)}{(1+z)}(1 - e^{-\tau_\nu}) \approx \frac{T_s - T_\gamma(z)}{(1+z)}\tau_\nu, \quad (2.9)$$

con  $z$  como el corrimiento al rojo relacionado con la frecuencia de observación  $\nu$  a través de la relación estándar  $1+z = \nu_{21}/\nu$ . Por otro lado,  $\tau_\nu$ , está dada por

$$\tau_\nu = \frac{3}{32\pi} \frac{hc^3 A_{10}}{k_B T_s \nu^2} \frac{\bar{x}_{HI} n_H}{(1+z)(dv_r/dr)}, \quad (2.10)$$

con  $A_{10} = 2.85 \times 10^{-15}$  el coeficiente de emisión de la transición de la línea de 21-cm,  $\bar{x}_{HI}$  la fracción de átomos de Hidrógeno en estado neutro,  $n_H$  la densidad numérica del Hidrógeno y  $(dv_r/dr)$  es el gradiente de la velocidad radial a lo largo de la línea de visión, siendo  $v_r$  la velocidad radial física y  $r$  la distancia de co-movimiento (en promedio  $(dv_r/dr) = H_z/(1+z)$  donde  $H$  es el parámetro Hubble)[13]. Finalmente, en términos cosmológicos, la temperatura media de brillo se convierte en

$$\delta T_b = 27_{xHI}(1 + \delta_B) \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \sqrt{\frac{0.15}{\Omega_m h^2} \frac{1+z}{10}} \left( 1 - \frac{T_\gamma}{T_s} \right) [\text{mK}], \quad (2.11)$$

donde  $xHI$  es la densidad de Hidrógeno neutro,  $\Omega_m$  es el contraste de densidad del gas de hidrógeno y  $\Omega_b$  es la densidad de bariones en unidades de la densidad crítica. Se puede ver de 2.11 que  $\delta T_b$  se satura cuando  $T_s \gg T_\gamma$ , pero puede arbitrariamente volverse grande y negativa si  $T_s \ll T_\gamma$ . La observabilidad de la transición de la línea de 21 cm depende, por lo tanto, de la temperatura de espín; a continuación se describen los mecanismos que llevan a  $T_s$  a estar por encima o por debajo de  $T_\gamma(z)$ , lo cual determina si la señal de 21 cm aparecerá en emisión, absorción o no aparecerá en absoluto.

## 2.1.2 Temperatura de Spin

La temperatura de espín del hidrógeno neutro,  $T_s$ , se define a través de la relación entre las densidades numéricas de los átomos de hidrógeno en los niveles excitado y en estado básico según 2.1. Hay tres procesos que influyen en el número de partículas en los estados excitado y el estado básico: el acoplamiento radiativo con la CMB, el acoplamiento con el fotón Ly- $\alpha$  y las colisiones causadas por la temperatura cinética del gas. Cada uno de los procesos puede ser dominante en un momento dado de la historia cósmica. Cada una de estas épocas puede ser descrita por su ecuación de equilibrio donde se considera que se mantiene el equilibrio termodinámico de ellas con la temperatura de espín por medio de la primera ley de la termodinámica. Cuando la temperatura de espín alcanza el equilibrio con  $T_\gamma$ , 2.1 puede escribirse como

$$3e^{-T_*/T_\gamma} \approx 3\left(1 - \frac{T_*}{T_\gamma}\right). \quad (2.12)$$

Del mismo modo, si las colisiones son las dominantes se da el acople con la temperatura de cinética del gas,  $T_K$ , y 2.1 queda

$$3e^{-T_*/T_\gamma} \approx 3\left(1 - \frac{T_*}{T_K}\right). \quad (2.13)$$

Por otro lado, si el proceso que domina es el acoplamiento con el fotón Ly- $\alpha$  daría

$$3e^{-T_*/T_\gamma} \approx 3\left(1 - \frac{T_*}{T_\alpha}\right). \quad (2.14)$$

La velocidad de estos procesos es rápida en comparación con el tiempo de desexcitación de la línea, por lo que, aproximadamente, la temperatura de espín se determina por el equilibrio de estos efectos. En este límite, la temperatura de espín está dada por [2][3][13]

$$\frac{T_s - T_\gamma}{T_s} = \frac{x_{tot}}{1 + x_{tot}} \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_K}\right), \quad (2.15)$$

donde  $x_{tot} = x_\alpha + x_c$  es la suma de los parámetros de umbral radiativo y colisional, respectivamente, que están dados por

$$x_\alpha = \frac{4P_\alpha T_*}{27A_{10}T_\alpha},$$

y

$$x_c = \frac{4\kappa_{1-0}(T_k)n_H T_*}{3A_{10}T_\gamma},$$

donde  $P_\alpha$  es la tasa de dispersión de Ly $\alpha$ , que es proporcional a la intensidad de Ly $\alpha$ , y  $\kappa_{1-0}(T_K)$  se tabula en función de  $T_K$  [14].

### 2.1.3 Evolución cosmológica de la línea de 21-cm

La estructura característica de picos y depresiones de la evolución de la línea de 21 cm codifica información sobre acontecimientos cósmicos globales. En la Figura 1.1, se muestra la evolución de la señal global de 21 cm a través de la historia cósmica, en función de la frecuencia y el desplazamiento al rojo, así como una evolución temporal desde el Big Bang. Dicha evolución se puede expresar en términos de la temperatura de brillo de la siguiente manera:

- Para tiempos muy tempranos ( $1100 \lesssim z \lesssim 200$ ),  $T_K$  y  $T_\gamma$  están bloqueados juntos, por lo que  $\delta T_b = 0$ . Los electrones conducen  $T_K$  a  $T_{CMB}$ , y por tanto  $T_b = T_{CMB}$ . Esto indica que el principal proceso físico que se presenta es la dispersión Compton de electrones por fotones.
- Entre  $200 \lesssim z \lesssim 30$  es la época conocida como la Edad Oscura. A medida que el universo se expande, la temperatura del gas,  $T_K$  desciende más rápidamente que  $T_{CMB}$ .  $T_K$  y  $T_s$  están entonces en equilibrio. El acoplamiento colisional mantiene  $T_s$  por debajo de  $T_{CMB}$ , y por tanto podemos observar una absorción de radiación de la línea de 21 cm. Hacia  $z \approx 80$ , después de que el universo se haya expandido aún más, el gas está demasiado diluido y tiene pocos electrones residuales libres para mantener el equilibrio entre  $T_K$  y  $T_s$ , con lo que  $T_s$  vuelve a  $T_{CMB}$  [15].
- El amanecer cósmico se establece entre ( $30 \lesssim z \lesssim 15$ ), considerada como la época cuando nacieron las primeras estrellas y galaxias del universo. La aparición de estas estrellas crea fotones  $Ly_\alpha$ , que pueden causar cambios en los estados cuánticos del hidrógeno neutro, a través del efecto Wouthuysen-Field [70][71]. Durante este tiempo,  $T_s = T_K$  y  $T_K < T_\gamma$ , reflejando por tanto una característica en absorción en  $T_b$ . En momentos posteriores ( $z \lesssim 20$ ), los núcleos galácticos activos (AGNs) producen rayos X que aumentan  $T_K$ . Como  $T_K$  todavía está acoplado a  $T_s$ ,  $T_b$  se ve en emisión.
- Comienza la época de reionización ( $15 \lesssim z \lesssim 6$ ), es decir, cuando desaparece el hidrógeno neutro. Esto ocurre debido a la emisión continua de fotones UV en la IGM. Después de la EoR, la señal global deja de existir, ya que los átomos de hidrógeno neutro se han ionizado.

## 2.2 Retos en la detección de la señal global de 21-cm

### 2.2.1 Selección y caracterización de sitios radiosilentes a bajas frecuencias

Uno de los desafíos más significativos en la observación de la señal de la EoR desde la Tierra es la interferencia de radiofrecuencia (RFI). A diferencia de la contaminación por fuentes astronómicas cercanas, la RFI consiste principalmente las transmisiones artificiales en la banda VHF, como la radio y la televisión FM, así como otros servicios más pequeños, privados o intermitentes. En áreas pobladas, la potencia transmitida por estos servicios es extremadamente

fuerte en comparación con la señal cósmica [16]. Desafortunadamente, la radiación a esta frecuencia no está restringida a la distancia de la línea de visión, pudiendo propagarse muchas decenas de kilómetros para un transmisor de FM típico, incluso sobre una topografía irregular. Por lo tanto, la selección de un sitio de observación está determinada en gran medida por su aislamiento con respecto a estas fuentes artificiales.

A modo de ejemplo, la selección de Sudáfrica y Australia como ubicaciones para el telescopio SKA se realizó después de una campaña de prueba de sitios que inspeccionó regiones de África, Australia, Argentina/Brasil y China. El estudio abarcó el rango de 70 MHz a 20 GHz, pero se centró en la banda L (alrededor de 1 GHz) debido a su relevancia para la radioastronomía tradicional [17]. Entre un total de 17 factores que determinaron la elección final del sitio, el elemento de mayor peso (27%) fue el nivel de contaminación por RFI [19].

Los telescopios MWA, ASKAP y EDGES observan actualmente desde el Observatorio de Radioastronomía de Murchison (MRO) en la remota Australia Occidental, una reserva científica radio-silenciosa que pretende convertirse en el sitio principal del mundo para la cosmología de baja frecuencia. Las universidades australianas y el sector privado que colaboran con estos telescopios, y con el futuro SKA, se han beneficiado directamente de la disponibilidad de este sitio en ese continente. Por otro lado, el desierto de Atacama y otros candidatos a sitios chilenos no han recibido la misma atención ni han sido estudiados adecuadamente en la banda del VHF. En 2002, NRAO de EE. UU. llevó a cabo una medición de RFI de cuatro días en la meseta de Chajnantor en el rango entre 10 MHz y 18 GHz para determinar el nivel de contaminación en las frecuencias de RI de ALMA. Los resultados se compararon con mediciones similares realizadas anteriormente en Green Bank, West Virginia, y las conclusiones para la región de VHF estuvieron a favor de Chajnantor, debido a la transmisión significativamente más baja de radio FM [27]. Otro estudio, también dedicado a la banda del VHF, se realizó bajo el proyecto Medidor Autónomo de Radio Interferencia (MARI) [66] donde se concluyó que sitios como Quisquiro (en la región de Antofagasta - Chile) tiene niveles bajos de RI mejores que los encontrados en Chajnantor y que se ha vuelto motivo de atención para la futura implementación de radiotelescopios a baja frecuencia en Chile.

Existen fuentes secundarias de RFI que son casi tan relevantes como los transmisores terrestres de alta potencia, pero que requieren tratamientos diferentes. Las transmisiones de redes satelitales como Orbcomm tienen un impacto significativo en los datos cosmológicos. Este efecto se puede conocer bien ya que las coordenadas locales de los satélites se pueden determinar en todo momento con herramientas disponibles gratuitamente, y el período de tiempo en el que son visibles sobre el horizonte se puede descartar del análisis científico. Un telescopio también podría sufrir RFI cuando las transmisiones desde lugares distantes son reflejadas hacia la Tierra por aviones y, lo que es más importante, por la Luna. Los fenómenos naturales como los rayos y los meteoritos que atraviesan la atmósfera también generan interferencias de baja previsibilidad. Para tener en cuenta estos efectos, deben caracterizarse adecuadamente realizando un seguimiento de RFI a largo plazo en una variedad de condiciones ambientales. Finalmente, la RFI también es generada por equipos y cables eléctricos en las proximidades de la antena del

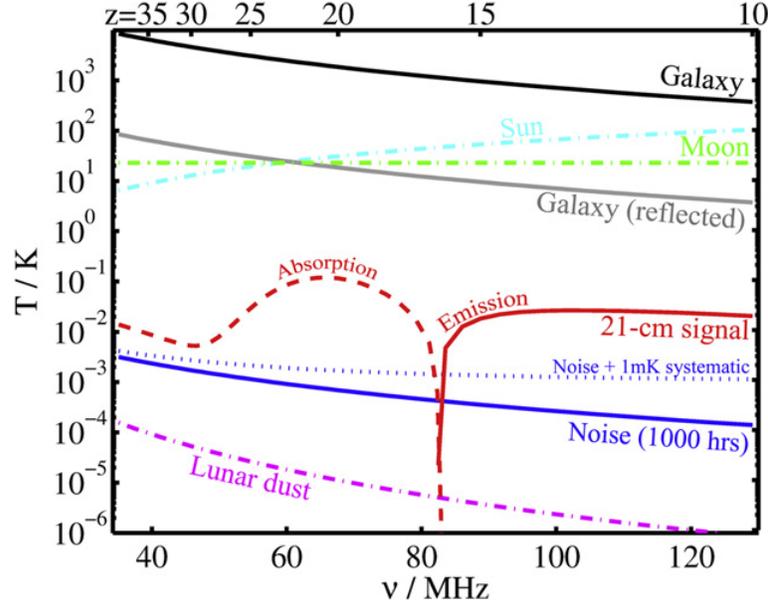


Figura 2.1: Comparación de la señal de 21 cm con varios foregrounds. Se muestra la contribución de la Galaxia para una región del cielo lejos del centro galáctico; la señal reflejada muestra la magnitud de esta emisión después de ser reflejada por la Luna y recibida a través del lóbulo trasero de la antena, lo que suprime su contribución relativa. La radiación térmica de la Luna también se ve suprimida al ingresar a través del lóbulo trasero. La Galaxia y el Sol opacan la señal de 21 cm (representada por una línea sólida roja cuando está en emisión y una línea punteada roja para la absorción). La curva sólida azul muestra el ruido térmico para 1000 horas de integración, mientras que la curva punteada azul muestra esto con la adición de un residual de 1 mK. El espectro de ruido causado por impactos de polvo es despreciable [59].

telescopio. En general, este tipo de contaminación es difícil de rastrear y tiene características de banda ancha que comprometen las observaciones debido a su compleja estructura de frecuencias. Se puede lograr una mitigación adecuada protegiendo el equipo con jaulas de Faraday, usando varias capas si es necesario.

### 2.2.2 Emisión del foregrounds (emisión sincrotrón)

Uno de los mayores retos a superar en un experimento de señal global de 21 cm es la presencia de una fuerte radiación de foregrounds en las frecuencias de interés. Estas fluctuaciones de foregrounds no son uniformes en todo el cielo. La presencia de emisiones sincrotrón de la Vía Láctea, que dominan el cielo en las frecuencias más bajas son de 3 – 5 ordenes de magnitud más grandes que la señal de 21-cm del hidrógeno neutro. A frecuencias más altas, las emisiones sincrotrón dejan de dominar, y experimentan una caída en función de la frecuencia (ver Fig.2.1).

La diferencia de intensidades demuestra la importancia de modelar ampliamente la señal y el

foregrounds galáctico. Se pueden simular bosques de líneas de 21 cm para la señal, con la intención de estudiar su comportamiento antes de la detección y comprender su significado astrofísico [18] [19] [20]. Para el foregrounds, se utilizan métodos estadísticos que introducen propiedades físicas como las contribuciones de la ionosfera, la opacidad o la eficiencia de ionización en regiones de formación estelar [4] [21] [22], con el propósito de obtener un modelo realista para esta brillante fuente de radio extendida. Sin embargo, primeras aproximaciones del modelado considerando únicamente la temperatura del cielo, dan información suficiente para conocer su comportamiento [23].

### 2.2.3 Procedimientos para la calibración de los instrumentos

La caracterización del instrumento es esencial para detectar con éxito la señal global de 21 cm. Debido a que esta señal puede verse afectada por el foregrounds y las fuentes instrumentales, es necesario contar con un excelente modelado de cada una de las partes que conforman el instrumento. La calibración se puede hacer siguiendo la metodología planteada por [24], que se resume en tres etapas. La primera, consiste en convertir la temperatura medida por la antena a una escala de temperatura. La segunda parte es la eliminación de las pérdidas debido a los ruidos internos de cada componente del instrumento. La tercera fase consiste en la compensación de la cromaticidad del haz de la antena, es decir conocer con mayor exactitud el comportamiento de la ganancia de antena en función del ángulo cenital y la frecuencia.

La temperatura de la antena,  $T_{ant}$ , puede expresarse como [25]

$$T_{ant} = T_{sky}(1 - |\Gamma|^2) + \dots, \quad (2.16)$$

donde  $T_{sky}$  representa la temperatura del cielo, y  $\Gamma$  corresponde a las pérdidas por retorno de la antena. Los puntos suspensivos indican la presencia de términos adicionales que también afectan la temperatura de la antena, como la desadaptación de impedancias y las reflexiones entre los amplificadores de bajo ruido (LNA) y la antena. Es importante destacar que  $\Gamma$  es un parámetro crucial en las mediciones, ya que tiene un impacto directo en la temperatura observada del cielo. Un valor alto de  $\Gamma$  indica una mayor pérdida de potencia, lo que resulta en una temperatura de la antena que puede diferir significativamente de la temperatura deseada,  $T_{sky}$ . Por lo tanto, minimizar  $\Gamma$  se convierte en una característica deseable del instrumento, ya que acerca la temperatura del cielo a la temperatura medida de la antena.

En el laboratorio, la calibración del instrumento puede realizarse con cuatro calibradores diferentes: una carga ambiente, una carga caliente, un cable largo abierto y un cable largo cortocircuitado. La carga ambiente y la carga caliente, que tienen temperaturas controladas de  $\approx 300$  K y  $\approx 400$  K respectivamente [24], se utilizan para proporcionar referencias de temperatura. Las referencias ambiente y caliente se miden en términos de temperatura de ruido, y se relacionan con las temperaturas físicas reales, que se miden mediante termistores.

Debido a los desajustes de impedancia, tener referencia de cables abiertos y en cortocircuito producen ondulaciones en el espectro medido que pueden utilizarse para estimar parámetros de ruido que están siendo introducidos en las observaciones. La calibración mediante estos elementos es importante para determinar la función de conversión de la temperatura de ruido medida por el instrumento a una temperatura de antena. Durante dichas mediciones, en el back-end, los coeficientes de reflexión de los calibradores se miden también mediante un VNA, ya que estos aparecen en los términos expandidos de la ecuación 2.16. El VNA debe ser calibrado de forma periódicamente, conectándolo a cargas estándares abierto, corto y de  $50 \Omega$  en el back-end.

Con el instrumento calibrado, es posible proceder a las mediciones en campo. Durante las observaciones regulares, el conmutador pasará por la antena, la carga caliente y la carga ambiente y calculará el espectro del cielo. Paralelamente a la medición de los niveles de temperatura de los cuatro calibradores, en el back-end, también se miden sus coeficientes de reflexión mediante un VNA. Una vez realizadas estas mediciones, se reconfiguran los conmutadores para medir los coeficientes de reflexión para los LNA, front-end y la antena. Las correcciones en los espectros integrados se producen utilizando la ecuación 2.16 en su forma expandida [24][25].

#### **2.2.4 Cromaticidad presente en el patrón de radiación de las antenas.**

La contaminación espectral debida a artefactos sistemáticos ha impedido hasta ahora una detección fiable de la señal global de 21 cm [33]. En particular, dado que la señal en dichos experimentos busca medir la variación de la temperatura de brillo de 21 cm con la frecuencia, cualquier error instrumental u observacional que afecte la potencia medida supone una grave limitación. Estos errores sistemáticos son especialmente limitantes puesto que los primeros planos son  $\sim 5$  órdenes de magnitud mayores que la señal de 21 cm esperada. En consecuencia, la medición del espectro de la señal de 21 cm requiere una comprensión precisa de los efectos dependientes de la frecuencia de la ganancia instrumental, la contribución del ruido instrumental, la forma del haz de la antena, junto con los fondos cósmicos (galácticos y extragalácticos) que varían espacial y espectralmente. Los efectos de estos parámetros no siempre son mutuamente separables, lo que complica aún más los esfuerzos de calibración y extracción de señales [23].

Los experimentos globales de 21 cm en curso se han centrado principalmente en frecuencias que van de 40 a 200 MHz ( $30 > z > 6$  [26, 31]). Sin embargo la señal global de 21 cm, especialmente en la banda de frecuencia más baja, requiere una evaluación estricta de los errores sistemáticos cromáticos presentes en los instrumentos. Las razones para ello son tres. En primer lugar, la magnitud de los efectos ionosféricos, como la refracción y la absorción, aumentan rápidamente al disminuir la frecuencia. En segundo lugar, las temperaturas de brillo del foregrounds galáctico aumentan con la disminución de la frecuencia como una ley de potencia con un índice espectral relativamente pronunciado de alrededor de  $-2,54$  [4, 5, 33, 61]. En consecuencia, cualquier error sistemático que sea multiplicativo, como ocurre en muchos de estos experimentos, puede socavar los esfuerzos de detección de señales de 21 cm de forma más severa a frecuencias más

bajas. Por último, tener un mayor ancho de banda fraccional en el rango de frecuencias más bajo conduce a una mayor variación de los haces de antena a lo largo del ancho de banda de medición, lo que produce mayores efectos cromáticos [23, 61].

## 2.3 Instrumentos para la detección de la línea de 21-cm

### 2.3.1 Instrumentos compactos de baja frecuencia

Los instrumentos compactos de baja frecuencia, que en general sirven a una amplia comunidad y tienen otros objetivos científicos además de la medición cosmológica, se han ubicado en diferentes lugares del mundo utilizando bajos niveles de Interferencia de Radiofrecuencia (RFI) como principal criterio para la selección del emplazamiento. Consideremos, por ejemplo, el Murchison Widefield Array (MWA) (ver Fig. 2.2) [28]. Se trata de un telescopio de conjunto de síntesis de apertura basado en dipolos y diseñado para operar en la gama de frecuencias de 80 - 300 MHz. El conjunto cuenta con 8192 dipolos activos de banda ancha y polarización dual, dispuestos en 512 “baldosas” de 32 dipolos cada una. Las baldosas están distribuidas de forma casi aleatoria en una apertura de 1,5 km de diámetro, con un pequeño número de valores atípicos que se extienden hasta los 3 km. El conjunto está situado en la región de Murchison, en el interior de Australia Occidental. Esta región se caracteriza por una densidad de población extremadamente baja y un entorno radioeléctrico extraordinariamente silencioso, lo que permite explotar al máximo las capacidades instrumentales [57]. Otro ejemplo es el Long Wavelength Array (LWA). Se trata de un radiotelescopio polivalente que opera en la gama de frecuencias de 10 - 88 MHz. El LWA consta de 53 “estaciones” distribuidas por una región de unos 400 km de diámetro en el estado de Nuevo México (ver Fig. 2.3). Cada estación consta de 256 pares de antenas de tipo dipolo cuyas señales se forman en haces, cuyas salidas se transportan a una ubicación central para la obtención de imágenes de síntesis de apertura de alta resolución [29][65]. Otro ejemplo a mencionar es el Precision Array to Probe the Epoch of Reionization (PAPER) (Ver Fig. 2.4). Cada elemento del PAPER presenta un diseño de dipolo cruzado que mide dos polarizaciones lineales (X, Y) y que presenta respuestas espectral y espacialmente suaves hasta el horizonte con una Anchura Completa a la Mitad del Máximo (FWHM) de 60°. Estos elementos están desplegados en la reserva del Square Kilometre Array South Africa (SKA-SA), en el desierto de Karoo (Sudáfrica) [30].



Figura 2.2: Fotografía de una de las 32 antenas MWA actualmente desplegadas. El plano tierra de formado por la malla de alambre de  $5 \times 5$  metros está colocado directamente sobre el suelo y las antenas dipolo se sujetan a la malla [28].



Figura 2.3: Fotografía de una “base” de antena activa de LWA. Consiste de dos antenas dipolo tipo bowtie alineadas ortogonalmente en un mástil, sobre una pantalla de tierra metálico de  $3 \times 3$  m [29].

### 2.3.2 Instrumentos de una única antena

Ejemplos de instrumentos de antena única son el Dark Ages Radio Explorer (DARE) [59], el Broadband Instrument for Global Hydrogen Reionization Signal (BIGHORNS) [8], el Shaped Antenna measurement of background Radio Spectrum (SARAS) [31]. DARE orbitará la Luna durante una misión de 3 años y tomará datos sobre el lado lejano de la luna, el único lugar del sistema solar interior que se ha demostrado que está libre de interferencias de radiofrecuencia generadas por el hombre y de cualquier ionosfera significativa. El instrumento científico consiste en un radiómetro de baja frecuencia en el rango de banda de  $40 - 120$  MHz, que incluye antenas dipolo bicónicas cónicas eléctricamente cortas, un receptor y un espectrómetro digital. Este instrumento tiene una respuesta de frecuencia suave de las antenas y un enfoque de calibración espectral diferencial utilizando una técnica Markov Chain Monte Carlo para detectar la débil señal cósmica de 21-cm en presencia de las intensas emisiones de primer plano del Sistema Solar y Galácticas [59]. BIGHORNS es un radiómetro móvil de potencia total, que puede ser desplegado en cualquier ubicación remota con el fin de recoger datos libres de RFI. El radiómetro se



Figura 2.4: Fotografía de una de las antenas de PAPER en el Desierto de Karoo en Sudáfrica.

ha desplegado en lugares remotos y silenciosos en Australia Occidental y se han recogido datos del cielo con baja RFI. BIGHORNS en su forma actual permite la recogida de datos de buena calidad para sondear la posibilidad de detectar la señal global EoR [8]. La antena adoptada para el radiómetro espectral SARAS es una variante del dipolo esférico perfilado [69], diseñada para operar en la banda 87,5-175 MHz. Los elementos del dipolo tienen perfiles sinusoidales y se ha medido que la antena tiene un diagrama de haz que se desvía en menos del 3% de un diagrama de radiación coseno-cuadrado, que es lo esperado para un dipolo corto, sobre el ancho de banda de octava. Los brazos son de sección cuadrada y están contruidos con láminas de aluminio. SARA ha desplegado un balun consistente en un transformador y un híbrido de 180, que se colocan entre los brazos y este módulo sirve para transformar las señales equilibradas fuera de fase de los dos brazos en una señal desequilibrada en un cable coaxial. Esta variación está motivada por la necesidad de mantener líneas de transmisión cortas entre la antena y el receptor [31]. Por último, el Experimento para Detectar la Firma Global de EoR (EDGES) es uno de los más representativos en este campo. Un resumen de las características de las antenas utilizadas en los experimentos mencionados anteriormente es mostrado en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Comparación de los diseños de antenas utilizados en diversos experimentos para la observación de la EoR.

Experimento	Banda de operación (MHz)	Tipo de Antena	Ancho de banda fraccional ( $S_{11}$ a $-10$ dB)	Ancho de banda MHz	Comportamiento acromático
EDGES	100-200	Blade (Plano tierra metálico)	$\sim 56.66$ %	85	No
	50 - 100		$\sim 46.66$ %	35	(r.m.s.=0.015)
BIGHORNS	70 - 200	Espiral logarítmica cónica	$\sim 60$ %	90	No
SARAS	40 - 200	Monopolo esférico	$\sim 13.33$ %	16	Yes
DARE	40 - 120	Dipolo bicónica	$\sim 70$ %	56	No
MIST	25 - 105	Blade (Sin plano tierra)	$\sim 76.9$ %	50	No

## 2.4 Posibles tipos de antenas para la observación de la línea de 21 cm

Como se ha destacado en la sección 2.3, diferentes antenas presentan características únicas, como su ancho de banda y comportamiento a priori acromático. Por lo tanto, resulta necesario realizar un estudio y evaluación de diversos tipos de antenas con el fin de garantizar una detección óptima de esta señal cósmica de baja intensidad. Al comprender a fondo las ventajas y desventajas asociadas a cada tipo de antena, se podrá seleccionar la opción más adecuada para satisfacer las necesidades específicas de la observación de la línea de 21 cm. En esta sección, se presentarán y analizarán cuatro posibles geometrías de antenas que han sido objeto de estudio.

### 2.4.1 Antena monopolo G

La geometría de la antena monopolo tipo G, mostrada en la figura 2.5, fue propuesta en [32] y consta de dos estructuras rectangulares de diferentes tamaños, colocadas en un ángulo de  $45^\circ$ . Estos rectángulos comparten un punto común en la parte inferior, lo que le da el nombre de antena monopolo tipo G. El punto de alimentación se encuentra en la parte inferior de la

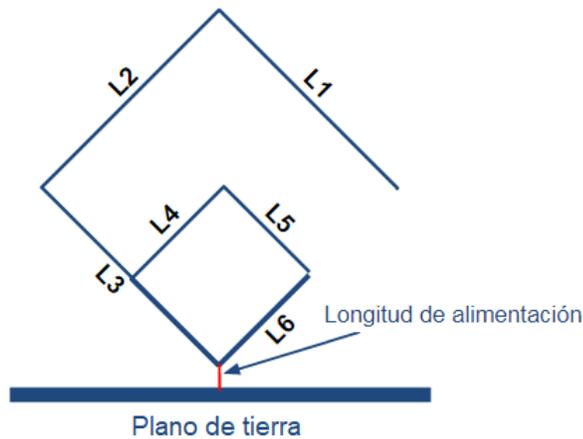


Figura 2.5: Esquema estructural de una antena monopolo tipo G.

estructura, entre el elemento radiante y el plano tierra. La estructura cuadrada más pequeña de la antena permite lograr una impedancia de entrada cercana a  $50 \Omega$ . Ajustando las dimensiones de  $L1$ , esta antena puede alcanzar fácilmente una característica de banda ancha. Por otro lado, las longitudes  $L2$  y  $L3$  se dimensionan en aproximadamente  $\lambda/4$  de la frecuencia de diseño. Esta longitud es importante para lograr una adaptación de impedancia adecuada. Además, las longitudes de  $L4$ ,  $L5$  y  $L6$  se dimensionan aproximadamente a  $\lambda/8$ . Estas longitudes más cortas permiten controlar el patrón de radiación y mejorar la eficiencia y directividad de la antena. En la figura 2.6 se puede observar el patrón de radiación, el cual puede ser “orientado” hacia el cenit, lo cual es una característica llamativa de estudio para su posible aplicación como prototipo de antena en experimentos de observación de la línea de 21 cm.

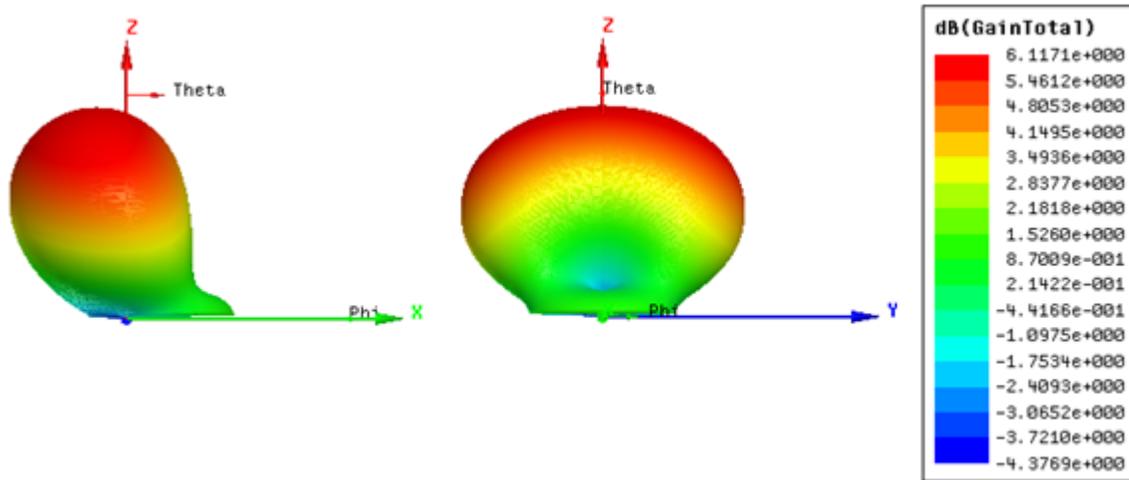


Figura 2.6: Patrón de radiación de una antena tipo G. En este caso, la dirección del eje z representa el cenit, y se puede observar que la antena alcanza su máxima ganancia en esa dirección.

## 2.4.2 Antena monopolo tipo Blade

El diseño de la antena monopolo tipo blade se basa en la geometría presentada en la Figura 2.7. Esta antena consiste en un plano de tierra y un elemento radiante cuya longitud ( $H$ ) es aproximadamente un cuarto de longitud de onda para la frecuencia más baja de interés. La longitud  $H$  está directamente relacionada con el ancho de banda de la antena, y si esta dimensión corresponde a aproximadamente  $\lambda/4$ , no se requieren circuitos de adaptación para lograr un amplio ancho de banda. La elección de una longitud  $H$  más corta responde a las restricciones de los sistemas de comunicación aerotransportados, donde se busca un tamaño de antena más reducido. Las dimensiones  $W1$  y la longitud de alimentación de la antena están directamente relacionadas con el límite superior de la banda de frecuencias, donde la antena suele tener una buena adaptación de impedancia. Estas dimensiones deben seleccionarse considerando otros factores, como el conector y la forma en que el elemento radiante se apoya en el plano de tierra. Las dimensiones  $W2$ ,  $W3$  y  $H3$  permiten un mayor ancho de banda de impedancia y reducen las variaciones de la Relación Onda Estacionaria [34, 35]. Por último, las dimensiones del plano de tierra deben garantizar una buena respuesta en frecuencia de la antena. Esta antena resulta atractiva para su estudio en la observación de la línea de 21 cm debido a sus bajos niveles de relación de la onda estacionaria, como se puede observar en la figura 2.8.

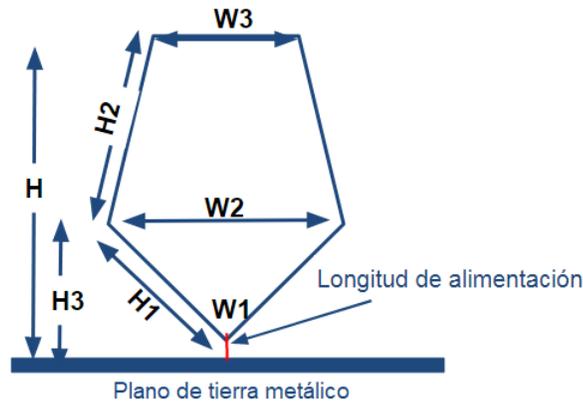


Figura 2.7: Esquema antena monopolo blade.

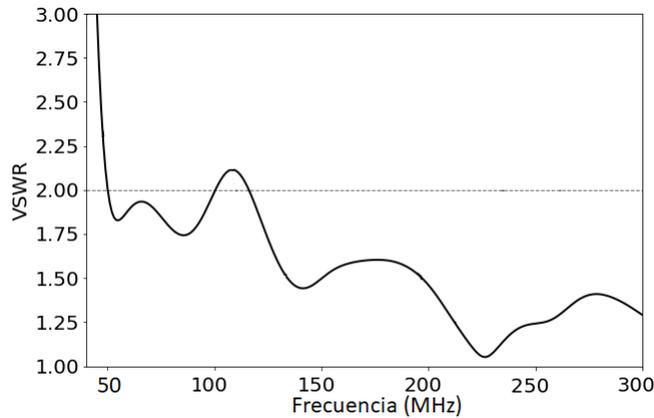


Figura 2.8: Relación de onda estacionaria simulada para la antena monopolo tipo blade.

### 2.4.3 Antena dipolo tipo Blade

En la figura 2.9 se puede apreciar la geometría característica de las antenas tipo blade, las cuales son reconocidas por su capacidad para operar en amplios rangos de frecuencia, desde HF hasta VHF y UHF. Estas antenas consisten en dos paneles rectangulares planos ubicados a una altura  $H$  sobre un plano de tierra. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el rendimiento de estas antenas puede verse afectado si su altura sobre el plano de tierra supera un cuarto de longitud de onda, ya que se generan estructuras no deseadas en el patrón de radiación, como lóbulos laterales no deseados, especialmente en el estudio de la línea de 21 cm. Para evitar estos efectos, se recomienda colocar los paneles a una altura mínima de  $\lambda/4$  de la longitud de onda más alta del rango de frecuencias deseado. Además, la longitud de alimentación de la antena afecta directamente su ancho de banda. Estudios han demostrado que el espesor de los paneles también influye en el comportamiento del patrón de ganancia y el ancho de banda de la antena [36, 37, 38]. Por lo tanto, el diseño y la optimización de esta antena tipo blade son relevantes para su aplicación en la observación de la línea de 21 cm. La comprensión y el control de estos parámetros de diseño permitirán maximizar el rendimiento

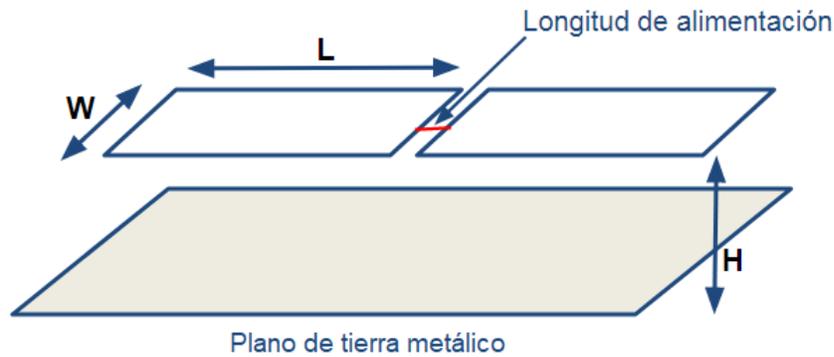


Figura 2.9: Esquema antena dipolo Blade.

de la antena en términos de ancho de banda, directividad y supresión de lóbulos laterales indeseables, lo cual es crucial para capturar de manera precisa y eficiente la señal cósmica débil de interés. Se destaca que esta antena ha sido ampliamente utilizada en el campo de la observación de la línea de 21 cm, como se evidencia en trabajos realizados por el grupo EDGES [4].

#### 2.4.4 Antena dipolo corbatín

Esta antena es una variante del dipolo blade. Al incorporar un ángulo oblicuo en la forma de los paneles, se mejora aún más su capacidad de adaptación y su ancho de banda [35]. El ángulo oblicuo mejora el ancho de banda al reducir la longitud total de la antena, lo que la hace más compacta pero adaptada a frecuencias de diseño más altas. La figura 2.10 muestra la geometría de este tipo de antenas, que hasta ahora ha sido poco estudiada en el campo de la radioastronomía. Sin embargo, su arquitectura ha sido objeto de investigación en otros campos, como las comunicaciones aeroespaciales, debido a su forma aerodinámica y su capacidad de adaptación a las estructuras de aviones y UAVs [35][39]. Para lograr una adaptación de impedancia adecuada y un rendimiento óptimo, la longitud de los paneles debe estar cerca de  $\lambda/2$ . Operando a esta longitud resonante de  $\lambda/2$ , la impedancia de entrada del dipolo es cercana a los 75 ohmios (en un dipolo en el vacío) y se puede adaptar fácilmente a la impedancia típica de la línea de transmisión de 50 ohmios. Esto es crucial para lograr una transferencia eficiente de energía, minimizando las pérdidas y las reflexiones de la señal.

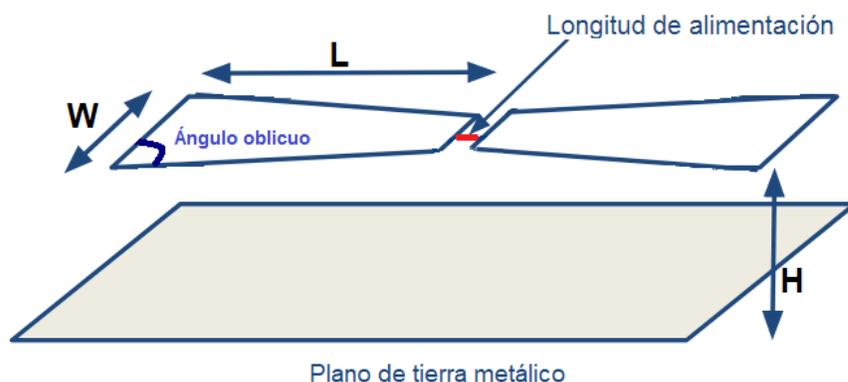


Figura 2.10: Esquema antena dipolo corbatín.

## 2.5 Método de optimización para mejorar la detección de la señal de 21 cm

La detección precisa de la señal global de 21 cm es fundamental para ampliar nuestro conocimiento sobre la evolución del universo. Para lograrlo, es importante explorar nuevas geometrías de antenas y/o optimizar las ya utilizadas en diferentes experimentos. En la sección 2.4 se han estudiado cuatro tipos de antenas potenciales para la observación de la línea de 21 cm, revelando la necesidad y la posibilidad de mejorar sus características.

La aplicación de métodos de optimización en el diseño de antenas para la detección de la señal de 21 cm ofrece una oportunidad atractiva para superar las limitaciones actuales y reducir las incertidumbres asociadas con su detección. Al explorar nuevas geometrías o mejorar las existentes, se puede mejorar la sensibilidad, la directividad y el ancho de banda de las antenas, lo que resulta en una detección más precisa y confiable de la señal.

El Particle Swarm Optimization (PSO) es un método ampliamente utilizado en la optimización de antenas, demostrando su eficacia en la mejora de sus características [40]. Al emplear PSO u otros métodos de optimización, es posible explorar diversas configuraciones geométricas y tamaños físicos de las antenas, con el objetivo de obtener prototipos mejorados que superen las limitaciones actuales. La aplicación de PSO en la optimización de antenas para la observación de la línea de 21 cm ha demostrado ser prometedora debido a sus características inherentes. Este método se basa en la simulación del comportamiento de un enjambre de partículas que se desplazan en un espacio de búsqueda para encontrar soluciones óptimas.

Una ventaja destacada de PSO es su capacidad para explorar eficientemente el espacio de búsqueda, evaluando simultáneamente múltiples configuraciones geométricas y tamaños de antena. Esto facilita la búsqueda de soluciones óptimas en un amplio espectro de parámetros. A medida que avanza en el proceso de optimización, PSO se adapta y ajusta, ya que las partículas del enjambre interactúan entre sí y con el entorno, compartiendo información sobre las mejores

soluciones encontradas. Esta interacción fomenta la exploración global y la convergencia hacia soluciones óptimas en el espacio de búsqueda.

En el contexto específico de la optimización de antenas para la observación de la línea de 21 cm, PSO permite mejorar características clave como el ancho de banda, la directividad y la adaptabilidad de las antenas. Al iterar y ajustar los parámetros del diseño utilizando PSO, es posible encontrar configuraciones que maximicen la captura de la señal débil cósmica y minimicen las fuentes de error sistemático. Esto resulta en una detección más precisa y confiable de la señal. El uso de PSO en la optimización de antenas para la observación de la línea de 21 cm ofrece una perspectiva atractiva para superar las limitaciones actuales y avanzar en nuestra comprensión del universo en evolución.

## 2.6 Comentarios finales

El presente capítulo abordó la detección de la señal global de 21 cm y la necesidad de aplicar métodos de optimización en el diseño de antenas para mejorar su detección. Se inició con una revisión del estado del arte y los fundamentos teóricos de la señal global de 21 cm, incluyendo la ecuación de transferencia radiativa, la temperatura de Spin y la evolución cosmológica de la línea de 21 cm. A continuación, se presentaron los retos en la detección de esta señal, como la selección y caracterización de sitios radiosilentes a bajas frecuencias, la emisión del primer plano (emisión sincrotrón), los procedimientos para la calibración de los instrumentos y la cromaticidad presente en el patrón de radiación de las antenas. Se describieron los instrumentos utilizados para la detección de la línea de 21 cm, incluyendo los instrumentos compactos de baja frecuencia y los instrumentos de una única antena. Además, se exploraron algunos posibles tipos de antenas para la observación de esta línea, como la monopolo G, monopolo tipo Blade y los dipolos tipo Blade y corbatín. Finalmente, se destacó la importancia de aplicar métodos de optimización en el diseño de antenas para mejorar la detección de la señal de 21 cm. Se mencionó el Particle Swarm Optimization (PSO) como un método efectivo para mejorar las características de las antenas, permitiendo explorar diferentes configuraciones geométricas y tamaños físicos de las mismas.

# Capítulo 3

## Búsqueda y caracterización de sitios para la observación de línea de 21 cm del Hidrógeno en Colombia

En este capítulo se explicará cómo se seleccionaron los sitios radiosilentes en Colombia para instalar un radiotelescopio de baja frecuencia. La elección de estos lugares es esencial para la investigación en este campo, el cual ha tomado importancia en Colombia en los últimos años. Al buscar estos sitios se consideraron diversos factores, como la ubicación geográfica en relación a la densidad poblacional, la interferencia electromagnética (RFI) y las condiciones atmosféricas. En particular, se enfatizó en el estudio de las precipitaciones en los sitios radiosilentes para asegurar la calidad de los datos que se puedan obtener con el radiotelescopio. Finalmente se muestra el análisis de las propiedades físicas (conductividad y resistividad) in-situ de uno de los lugares seleccionados. Por lo tanto, este capítulo detallará la metodología utilizada para identificar los sitios radiosilentes y cómo se evaluaron los diferentes factores para seleccionar los más adecuados. Además, es relevante destacar que el radiotelescopio MIST ha sido desplegado exitosamente en ubicaciones como Deep Springs Valley en California, Death Valley en Nevada y la Estación de Investigación Ártica de McGill (MARS) en el Ártico canadiense. Sin embargo, existe el interés de ampliar su alcance a otras latitudes, incluyendo Colombia. Por ende, resulta importante llevar a cabo estudios detallados para identificar sitios radiosilentes en Colombia que sean atractivos para el proyecto y cumplan con los requisitos necesarios para su despliegue exitoso.

### 3.1 Selección de sitios

Colombia se ubica estratégicamente en una posición geográfica favorable para la radioastronomía de baja frecuencia. Al estar cercana al ecuador, la región experimenta una reducida interferencia de radiación cósmica de fondo, lo cual la convierte en un entorno idóneo para captar señales de radio de baja intensidad provenientes del universo [45]. El país tiene una división política compuesta por 32 departamentos y un Distrito Capital, Bogotá, como su centro administrativo. La Figura 3.1 muestra la geografía de estos departamentos, proporcionando una visión

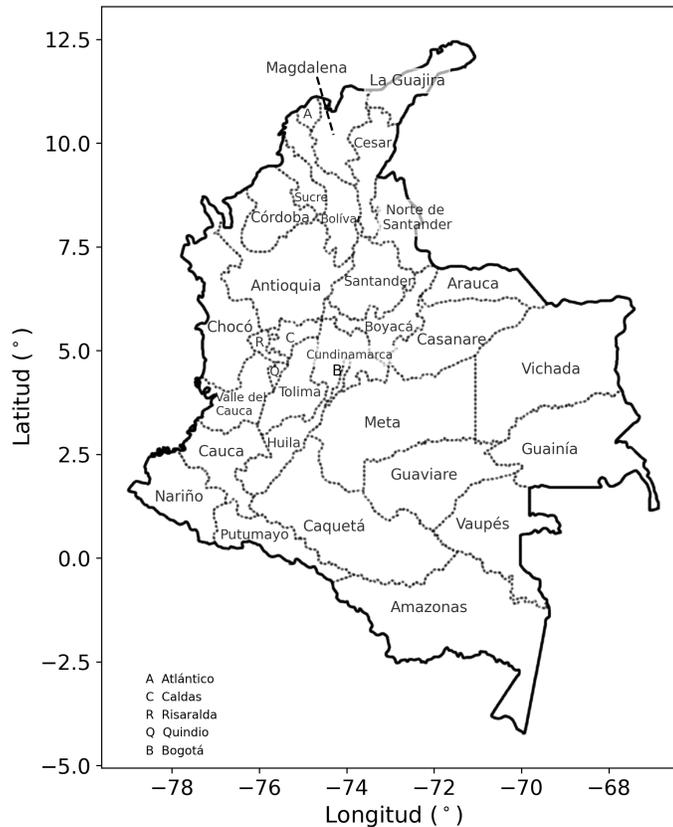


Figura 3.1: Distribución geográfica de los 32 departamentos de Colombia.

de su distribución en todo el territorio colombiano. En cada uno de estos 32 departamentos se extienden un total de 1123 municipios, lo que representa una rica diversidad de zonas para futuras investigaciones y observaciones astronómicas. La exploración de estos municipios promete ampliar significativamente el avance en el campo de la radioastronomía en Colombia.

### 3.1.1 Por densidad poblacional

La densidad poblacional resulta ser una variable importante para este estudio ya que existe una correlación entre el número de habitantes de una zona y la probabilidad de presencia de señales de RF procedentes de diversos sistemas de telecomunicaciones [55]. Esta correlación responde a la intención de entidades públicas y privadas por satisfacer la demanda de conectividad de los habitantes de una región. Las transmisiones, que guardan relación con la densidad de población y el grado de bienestar económico de la comunidad local, ofrecen una señal de fondo persistente que idealmente debería ser reducida con el fin de tener bajos niveles de RFI.

Para encontrar información relacionada a la densidad poblacional se recurrió a la base de datos reportada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [50]. De acuerdo con los datos disponibles, se escogió la variable densidad de viviendas por  $\text{km}^2$ , la cual

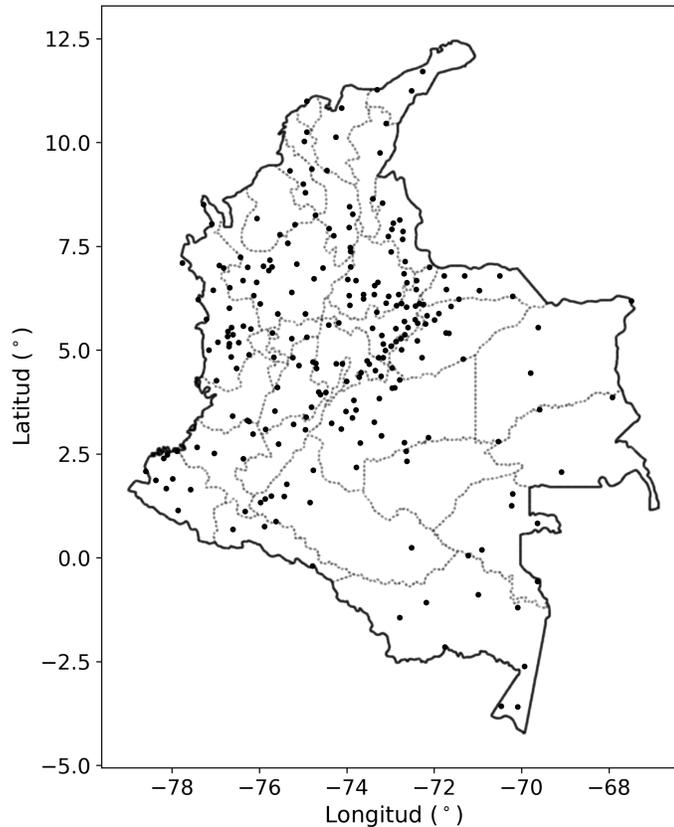


Figura 3.2: Municipios de Colombia con baja densidad poblacional.

se encuentra estrechamente relacionada con la cantidad de personas que habitan un área. Esta variable está dividida en 5 categorías, de las cuales únicamente se prefirió la de menor densidad. Por tanto, para este criterio se eligieron los municipios con una densidad de viviendas por  $\text{km}^2$  entre 0 y 5. De los 1123 municipios iniciales, se seleccionó aquellos cuya densidad poblacional estuviera dentro del criterio de selección. Se encontró que 244 municipios cumplían con este índice. En la figura 3.2 se muestra la ubicación de cada uno de ellos.

### 3.1.2 Por ocupación del espectro radioeléctrico en la banda del FM

Para iniciar cualquier observación en radioastronomía, es importante identificar y analizar cuidadosamente todas las interferencias de radiofrecuencia (RFI) posibles en las ventanas de observación seleccionadas. Esto es importante porque la RFI perturba significativamente las señales de los objetos celestes que generalmente son débiles. Gran parte del RFI es generado por instrumentación creada por el hombre, por actividades humanas esenciales como el acceso inalámbrico a Internet, satélites (GPS, GLONASS e IRIDIUM, entre otros), televisores, teléfonos móviles y otros equipos eléctricos personales básicos como computadoras portátiles, radios, calentadores eléctricos y aspiradoras. Este RFI se produce en áreas residenciales y com-

Tabla 3.1: Potencia de operación de la antena según la clase de la emisora.

Clase	Potencia mín. [W]	Potencia máx. [W]
A	15000	100000
B	5000	15000
C	250	5000
D	-	900

erciales con grandes densidades poblacionales.

En Colombia, las fuentes de RFI artificiales, como las señales de telecomunicaciones y navegación, están supervisadas principalmente por la Agencia Nacional del Espectro (ANE). A nivel internacional, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) supervisa la asignación de todas estas señales permitidas [47]. Estas señales, sin embargo, varían significativamente de un lugar a otro. Ambas organizaciones ayudan a proteger las principales ventanas con dedicación para la radioastronomía. Sin embargo, en el caso de la banda VHF operan servicios comerciales desde hace décadas los cuales dificultan la detección de señales de interés.

Por ejemplo, para la señal de la línea de 21 cm emitida en las épocas tempranas de evolución del universo, la cual se encuentra en un rango de frecuencias estimado entre 40 – 200 MHz (dentro de la banda VHF), es importante la identificación y caracterización de lugares radio silentes como se mencionó en el capítulo 2. Dentro de este rango se encuentra la sub-banda de 88 MHz - 108 MHz donde operan las emisoras de FM comercial, que constituyen la mayor fuente de interferencia para la observación de la línea de 21 cm. Las mediciones de RFI realizadas en estudios como [48, 66] confirman la operación de FM como el principal obstáculo para los receptores de baja frecuencia.

En Colombia el Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones (MinTIC) generó el plan técnico nacional de radiodifusión sonora FM. En este documento se especifican los aspectos técnicos necesarios para la instalación de las antenas de las distintas emisoras, por ejemplo, la potencia de operación, la frecuencia de enlace y la altura permitida en el lugar de la instalación [49]. Las emisoras se dividen en las clases A, B, C y D cuya distinción principal es cubrir áreas más o menos extensas en el municipio en donde se otorgó la concesión para la operación. Este rango de cobertura se relaciona con la potencia de la antena que es instalada según la clase. En la Tabla 3.1 se muestran las potencias mínimas y máximas permitidas para la antena según la clase.

La clasificación de las emisoras también se puede realizar según la orientación de sus contenidos, dividiéndolas en tres categorías principales: emisoras comerciales, de interés público y comunitarias. Esta nueva categorización se entrelaza con el área de servicio, donde las emisoras comerciales abarcan el mayor cubrimiento, por tanto, muchas de ellas son clase A. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta amplia cobertura puede interferir significativamente con la detección de la señal de 21 cm, lo que podría descartar ciertas ubicaciones para la observación

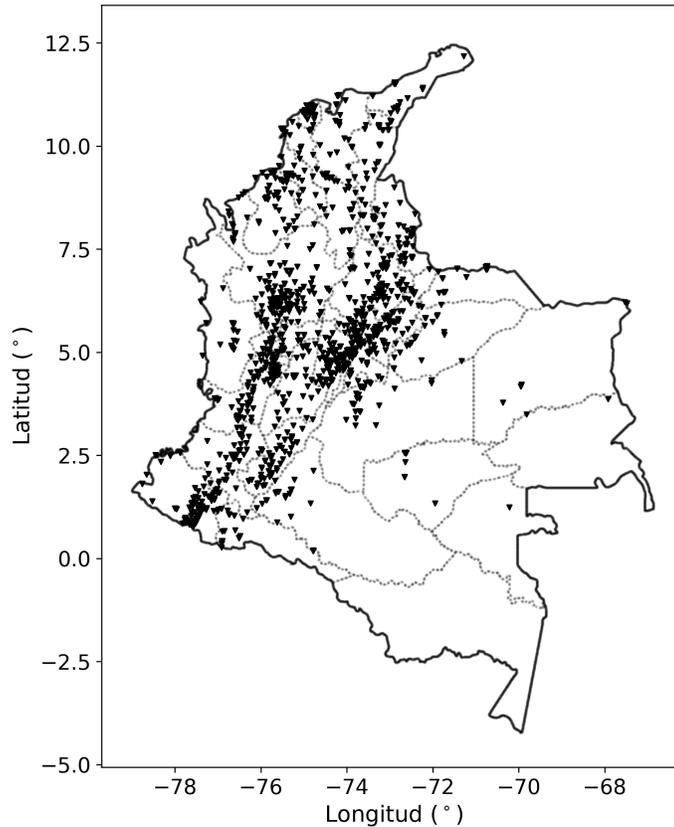


Figura 3.3: Antenas de emisoras FM instaladas en Colombia [51].

astronómica. A continuación, se profundizará en este aspecto y se analizará detalladamente cómo la presencia de emisoras de clase A puede afectar la observación de señales de radio de baja intensidad provenientes del universo.

La Agencia Nacional del Espectro (ANE) es la entidad colombiana encargada de administrar, gestionar y vigilar el espectro radioeléctrico. Por esta razón, la ANE ha desarrollado una herramienta denominada visor del espectro, con la cual es posible conocer el despliegue de las antenas de varios servicios de telecomunicaciones, incluida la radio FM [51]. En este visor se puede observar la ubicación de cada una de las antenas, la clasificación de la emisora que la instaló, la frecuencia de operación y la altura en la que fue instalada. En la figura 3.3 se muestran las emisoras de FM en Colombia representadas por triángulos inversos. La distribución espacial de las antenas no es homogénea sobre el territorio. La mayor acumulación está en los departamentos ubicados sobre las cordilleras mientras que en los departamentos hacia el oriente colombiano el número de antenas disminuye considerablemente.

Después de considerar los amplios rangos de cobertura de las antenas instaladas por emisoras comerciales, se concluyó que era importante seleccionar cuidadosamente los lugares de interés para su estudio y caracterización como radiosilentes en Colombia. Con este objetivo, se selec-

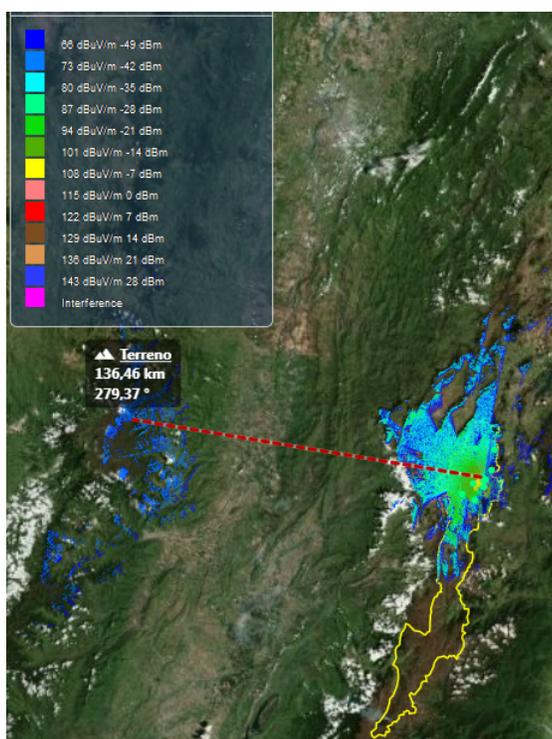


Figura 3.4: Rango de cubrimiento de la emisora RCN. Frecuencia de operación 93.9 MHz y potencia de su antena de 25 kW.

cionaron 244 municipios según criterios de densidad poblacional, y se realizó un análisis con el visor de la ANE en un radio de 50 km para verificar que no existieran señales de radio emitidas por emisoras comerciales o que no superaran los  $-50$  dBm. Este radio fue considerado suficiente para la futura instalación de un radiotelescopio, ya que cubriría un área de aproximadamente  $8000 \text{ km}^2$  libre de la principal interferencia para su funcionamiento en la banda de 40 MHz – 120 MHz. La figura 3.4 muestra un ejemplo de la emisora comercial RCN (Clase A) con una frecuencia de 93.9 MHz y potencia de la antena de 25 kW, la cual cubre principalmente a Bogotá y alcanza a llegar a 136.5 km de distancia, lo que destaca la importancia de evaluar cuidadosamente los lugares propuestos para la instalación de radiotelescopios.

La figura 3.6 muestra un ejemplo del resultado obtenido para el municipio de Uribia, Guajira. Para obtenerlo, se activaron todas las emisoras comerciales del departamento y de los departamentos cercanos en el visor de la ANE. Como se puede observar, en el radio de 50 km establecido no se detectó ninguna señal de radio FM, lo que indica que este lugar podría ser una buena opción para la instalación de un radiotelescopio. Este mismo proceso se repitió para cada uno de los sitios previamente seleccionados. Como resultado se encontró que de los 244 municipios, 65 de ellos se encuentran con niveles bajos o nulos de interferencia 3.5. Es importante destacar que las emisoras no comerciales, como las comunitarias o de interés público, no se consideraron como criterio de exclusión para un sitio. Esto se debe a que, por lo general, estas emisoras son de clase C o D y sus antenas tienen una menor potencia y un rango de cobertura más reducido.

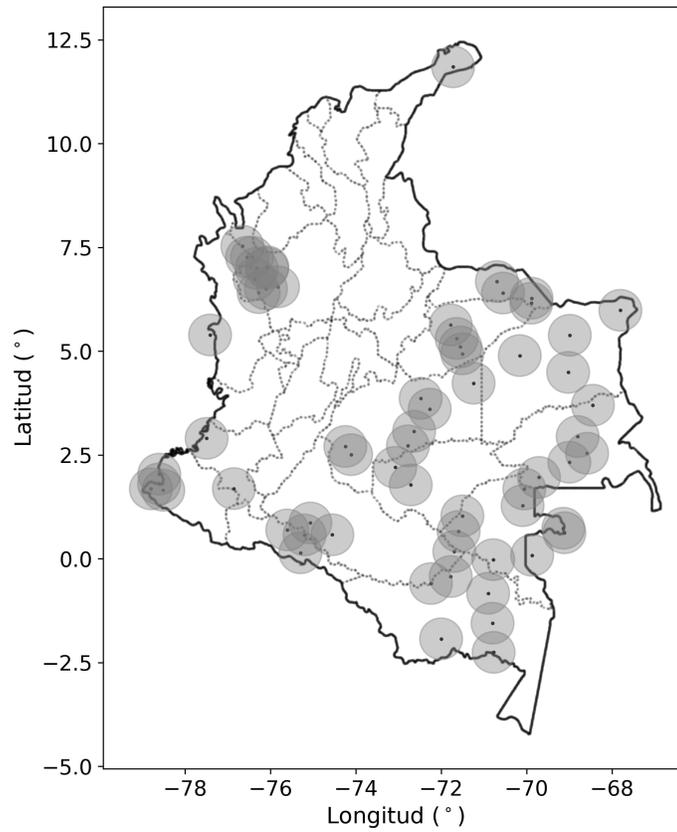


Figura 3.5: Zonas con niveles de RFI nulos y/o menores a  $-50$  dBm.



Figura 3.6: Municipio de Uribe con un rango de 50 km libres de señales de radio FM [51].

Para verificar su presencia en el radio de 50 km, se registró el número de antenas de este tipo de emisoras en cada uno de los 65 lugares candidato (ver Tab. 3.2), para confirmar que no afectarían el funcionamiento del radiotelescopio.

Tabla 3.2: Municipios en Colombia con posible baja interferencia RFI.

Departamento	Municipio	No. de antenas comunitarias
Amazonas	Puerto Alegría	0
	La Chorrera	0
	El Encanto	0
	Santander Araracuara	0
	Puerto Arica	0
	Tarapacá	0
	Leticia	0
	La Pedrera	0
	Minti - Paraná	0
	La Victoria Pacoa	0
Antioquia	Dabeiba	1
	Ituango	1
	Mutatá	1
	Murindó	0
	Frontino	2
	Urrao	0
	Vigía del Fuerte	0
Arauca	Arauca	0
	Puerto Rondón	0
	Cravo Norte	0
Caquetá	Solano	1
	Cartagena del Chairá	0
	San Vicente del Caguán	1
	Solita	1
Casanare	Orocué	1
	Hato Corozal	0
	San Luis de Palenque	1
	Paz de Ariporo	0
	Trinidad	0
Cauca	López de Micay	1
Chocó	Bojayá	0
	Carmen del Darién	0
	Alto Baudó	1
Córdoba	Tierralta	0
Guainía	Inírida	0
	Morichal	0
	Puerto Colombia	0
	Pana - Pana	0
	Barranco Mina	0

<b>Departamento</b>	<b>Municipio</b>	<b>No. de antenas comunitarias</b>
Guaviare	Miraflores	0
	San José del Guaviare	0
La Guajira	Uribia	0
Meta	La Macarena	0
	Mapiripan	0
	Puerto Gaitán	0
	Puerto López	0
	San Martín	0
	Uribe	0
Nariño	Roberto Payán (San José)	1
	Magui Payán	0
	Los Andes	2
	Barbacoas	0
	La Tola	2
Putumayo	Puerto Leguizamo	0
	Puerto Guzmán	1
Vaupés	Papunanua	0
	Yavaraté	0
	Pacoa	0
	Taraira	0
	Carurú	0
	Mitú	0
<b>Departamento</b>	<b>Municipio</b>	<b>No. de antenas comunitarias</b>
Vichada	La Primavera	0
	Cumaribo	0
	Santa Rosalía	0
	Puerto Carreño	0

### 3.1.3 Por precipitación

La selección de los sitios para la construcción de un radiotelescopio requiere considerar diversos factores, y uno de los más importantes es el comportamiento climatológico en términos de precipitaciones. Las lluvias pueden afectar las mediciones del radiotelescopio de múltiples maneras, por ejemplo, absorbiendo o dispersando la radiación electromagnética que se desea detectar, lo que reduce la precisión de las mediciones o incluso las hace imposibles de realizar. Además, las gotas de lluvia pueden reflejar la señal de radio en direcciones no deseadas, causando interferencias y afectando la calidad de los datos obtenidos. Por otro lado, un exceso de precipitaciones puede dañar la estructura del radiotelescopio, generando corrosión y desgaste en los componentes, lo que impacta su funcionamiento a largo plazo. Eventos climáticos como tormentas y vientos fuertes también pueden causar daños físicos directos en la estructura del instrumento, lo que puede ser costoso y difícil de reparar. Por estas razones, es crucial considerar

cuidadosamente los niveles de precipitaciones en el lugar donde se construirá el radiotelescopio y tomar medidas para protegerlo de los efectos negativos del clima.

En nuestro caso, para seleccionar los sitios potenciales donde construir un radiotelescopio, evaluamos el comportamiento climatológico respecto a las precipitaciones en 65 municipios con baja densidad poblacional y niveles de interferencia electromagnética bajos o nulos. Se tuvo en cuenta como fuente primaria la revisión de la plataforma de consulta y descargas de datos hidrometeorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM [52], ya que cuenta con la información de las estaciones hidrometeorológicas existentes en el país. Se recopiló la información de precipitación mensual de los últimos diez años hasta el 31 de diciembre de 2021. Las fuentes secundarias utilizadas fueron Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) [53] y Google Earth Engine [54]. La plataforma POWER, proporciona datos climatológicos recopilados de manera satelital por la NASA. Esta plataforma permite obtener datos históricos y actuales de diferentes parámetros. Los datos que se encuentran en esta plataforma son de uso libre y cuenta con un visor de acceso donde se selecciona el parámetro climatológico que se desea obtener en el rango de tiempo de estudio. Por otro lado, Google Earth Engine, cuenta con un modo de acceso a la información almacenada a través de un script y de interfaz directa con la estación CHIRPS [54]. Este conjunto de datos de precipitación es global con información de más de 30 años [54].

Posteriormente, se realizó un análisis estadístico para conocer el comportamiento de la precipitación mensual durante los últimos diez años en cada punto seleccionado, considerando variables como el promedio, desviación estándar y cuartiles. Para delimitar el área donde se encuentran distribuidos los puntos y conocer el comportamiento de la precipitación en un lapso de tiempo determinado, se utilizó la herramienta de los polígonos de Thiessen. Este método consiste en delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos y generar polígonos que demarcan un área para cada clúster y/o sitio individual. Estos polígonos se usaron para elaborar mapas de precipitación que buscan visualizar las zonas de influencia. En la figura 3.7 se muestra el mapa de precipitación para los sitios seleccionados en la tabla 3.2 que presentan, según el estudio, niveles de precipitación menores a 100 mm. Se puede observar que la distribución de la mayoría de zonas con baja precipitación en Colombia se encuentra sobre los departamentos de: La Guajira, Arauca, Casanare, Vichada, Meta.

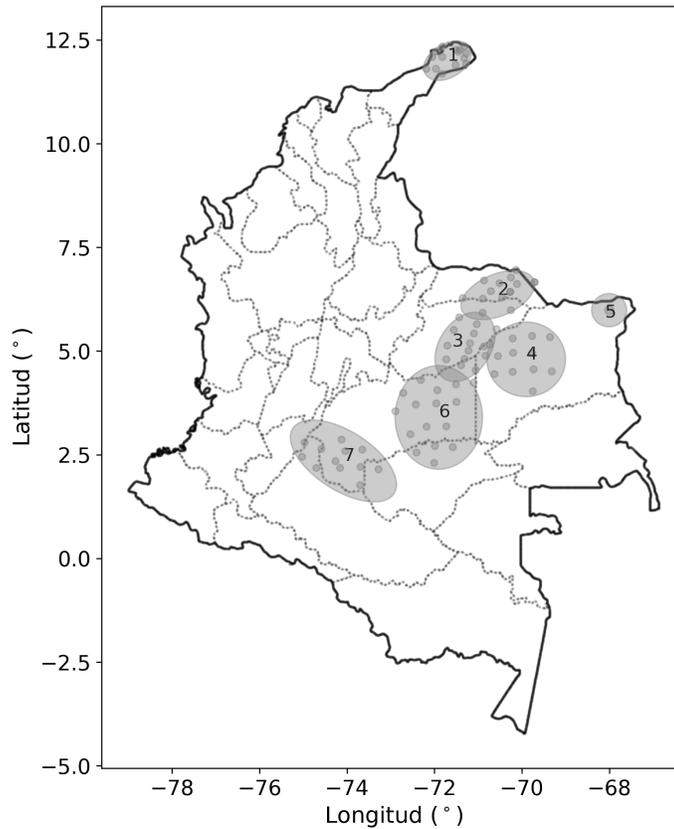


Figura 3.7: Precipitación en las áreas seleccionadas con bajo nivel de RFI.

### 3.1.4 Selección final de sitios adecuados

En el proceso de selección de ubicaciones óptimas para la instalación del radiotelescopio, se llevaron a cabo evaluaciones basadas en tres criterios fundamentales: interferencia electromagnética, precipitación mensual menor a 100 mm y seguridad política. Para determinar qué factores tenían mayor peso en la selección, se asignó una importancia relativa a cada uno de ellos en una escala que iba del 1 al 10. Esta asignación de importancia reflejaba claramente las prioridades y objetivos específicos que se tenían en cuenta para el radiotelescopio. Por ejemplo, se otorgó una alta importancia de 10 a la interferencia electromagnética debido a su impacto directo en la calidad de las observaciones realizadas. Para precipitaciones se asignó un valor de 8 y finalmente la seguridad política se le otorgó un valor de 6.

Una vez que se asignaron las importancias relativas, se procedió a evaluar cada municipio candidato en función de los factores identificados. Cada municipio recibió una calificación basada en su cumplimiento con respecto a los criterios establecidos. Estas calificaciones se ponderaron según las importancias asignadas, lo que permitió obtener una calificación ponderada para cada municipio. Este enfoque ayudó a destacar las ubicaciones que mejor se ajustaban a los requisitos específicos del proyecto. Además de la ponderación de factores, se empleó una prueba de hipótesis para evaluar de manera estadística si existían diferencias significativas entre las ubi-

Tabla 3.3: Ranking de los lugares ideales encontrados para la implementación de un radiotelescopio a baja frecuencia en Colombia

Municipio	Ranking
Guajira	1
Arauca	2
Meta (La macarena)	3
Meta (Puerto López)	4
Casanare (Orocué)	5
Casanare (Trinidad)	6
Vichada	7

caciones potenciales. Esta prueba proporcionó una base adicional para la toma de decisiones al analizar la evidencia disponible.

El resultado de este proceso se resumen en la tabla 3.3. Se identificaron siete lugares que cumplían con los criterios establecidos de manera sólida. Estas zonas representaban sitios prometedores y adecuados para la ubicación final del radiotelescopio.

Para conocer cómo responderá la antena en las condiciones reales, es esencial realizar la caracterización de las propiedades físicas del suelo en cada uno de los sitios seleccionados. En la siguiente sección, se llevarán a cabo las pruebas y la caracterización del suelo en un sitio específico que se ha elegido para este propósito, ya que cumple con las condiciones necesarias para realizar este proceso de manera efectiva. Una vez que se obtengan los resultados esperados en este sitio piloto, se procederá a verificar la calidad de la metodología utilizada y, en caso de ser necesario, se realizarán ajustes para asegurarse de que sea precisa y confiable.

El propósito es validar dicha metodología para que sea aplicada a los sitios seleccionados, lo que permitirá obtener una visión más amplia y completa de las propiedades físicas de los sitios radiosilentes en Colombia. Esto brindará una base sólida para la instalación de las antenas y garantizará que se conoce su funcionamiento en el ambiente real de cada ubicación específica. Asimismo, facilitará una mejor comprensión de las condiciones del terreno y sus efectos en la detección de la señal de radio, lo que contribuirá a la mejora general del estudio y el éxito de este tipo de experimentos.

## 3.2 Caracterización de las propiedades físicas del suelo en un sitio conocido previamente

### 3.2.1 Descripción del sitio seleccionado

El sitio seleccionado para las mediciones es el Páramo de Berlín, una zona de particular interés y objeto de estudio por parte de la Universidad Industrial de Santander en colaboración con

nuestro equipo. El área de estudio se encuentra en el Refugio Piedra Parada, ubicado en el Páramo de Berlín, Santander, Colombia, en el kilómetro 57 de la carretera que conecta Bucaramanga con Cúcuta. El Páramo de Berlín forma parte de la Cordillera Oriental de los Andes, ubicado en la región nororiental de Colombia. Este complejo de páramos, conocido como Jurisdicción, Santurbán, Berlín, abarca alrededor de 142.000 hectáreas entre los departamentos de Santander y Norte de Santander, con altitudes que oscilan entre los 2.800 y 4.290 metros sobre el nivel del mar. Aproximadamente el 28% de estas tierras se encuentra en el departamento de Santander, mientras que el 72% restante se sitúa en Norte de Santander. Es relevante destacar que la Universidad Industrial de Santander posee predios en este lugar, donde llevaremos a cabo las mediciones necesarias. Este páramo se caracteriza por su alta biodiversidad y su papel fundamental en la regulación hídrica de la región, siendo la principal fuente de agua para numerosos ríos y acuíferos. Además, alberga una amplia variedad de flora y fauna, muchas de las cuales son especies endémicas y se encuentran en peligro de extinción. Gracias a su ubicación geográfica, presenta condiciones climáticas especiales, con temperaturas frías durante todo el año y una marcada variación en la cantidad de precipitación en diferentes épocas. Debido a la importancia ambiental y ecológica del páramo, ha sido objeto de numerosos estudios científicos y programas de conservación, incluyendo investigaciones realizadas por la Universidad Industrial de Santander con el propósito de comprender y preservar este valioso ecosistema. Nuestro trabajo en este sitio nos permitirá obtener datos cruciales para avanzar en nuestra comprensión de las propiedades físicas del suelo en el contexto de nuestro proyecto de radiotelescopio de baja frecuencia.

### 3.2.2 Experimento

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) son, actualmente, uno de los métodos geofísicos más precisos para conocer las condiciones del subsuelo. Para interpretar una curva de SEV, se busca un modelo detallado del subsuelo compuesto por materiales con diferentes resistividades y espesores/profundidades, de manera que la curva calculada para el modelo coincida con la curva de campo. Este modelo es solo uno entre muchos otros que también producen curvas de sondeos que se ajustan con poco error a la curva obtenida en el campo. Esta similitud de modelos se conoce como Equivalencia. El método geofísico implementado fue el arreglo de Schlumberger [56]. Consiste en inyectar una corriente eléctrica en el terreno y observar la respuesta resistiva de los diferentes materiales presentes en el subsuelo al paso de la corriente. Se utilizan 4 electrodos distribuidos simétricamente, dos en los extremos donde se inyecta la corriente y dos en el centro de los anteriores (ver Fig.3.8), donde se mide la caída de voltaje que se produce al pasar por el suelo debido a su resistividad. El equipo utilizado para las mediciones fue un telurómetro UT523A. La configuración experimental para las mediciones se muestra en la Figura 3.9 y consiste de 4 electrodos enterrados en el suelo. Mediante el telurómetro se hace circular una corriente ( $I$ ) entre los dos electrodos externos (electrodos de corriente A y B) y se mide la caída de potencial ( $V$ ) con los dos electrodos internos (electrodos de potencial). El telurómetro realiza la relación  $V/I$  dando un valor de resistencia aparente ( $R$ ) en ohmios. La resistividad aparente ( $\rho_a$ ) correspondiente a la resistividad medida aproximadamente a una profundidad  $a$ , se calcula considerando la resistencia entregada por el instrumento de medida mediante

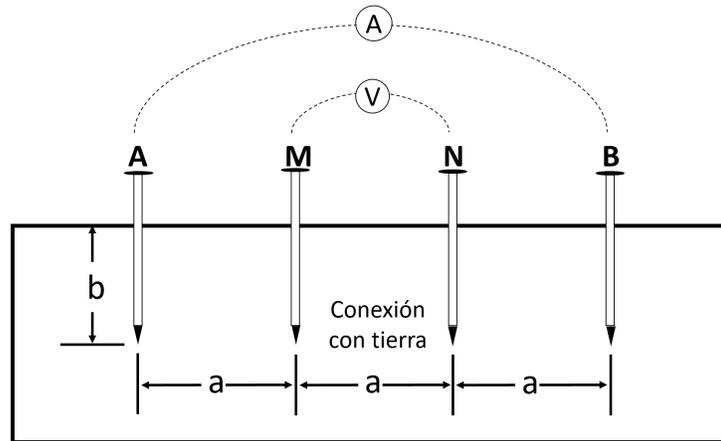


Figura 3.8: Arreglo método de Schlumberger.

la ecuación  $\rho_a = 2\pi aR$ . Por otro lado, se utilizó el software de interpretación (IPI2WIN) que encuentra un modelo del subsuelo geológicamente razonable, y luego se promedian los modelos similares, ajustando el modelo definitivo con los datos de la geología del sitio de sondeo. El análisis a través de un geólogo y las restricciones impuestas por la geología del área, basadas en resistividades típicas para ciertos tipos de rocas, ayudan a eliminar muchos modelos matemáticamente equivalentes y alejados de la naturaleza de las verdaderas unidades geológicas del subsuelo. Este análisis se apoyó en la interpretación de un geólogo con experiencia, lo que permite tener un pronóstico confiable en la caracterización de suelos.

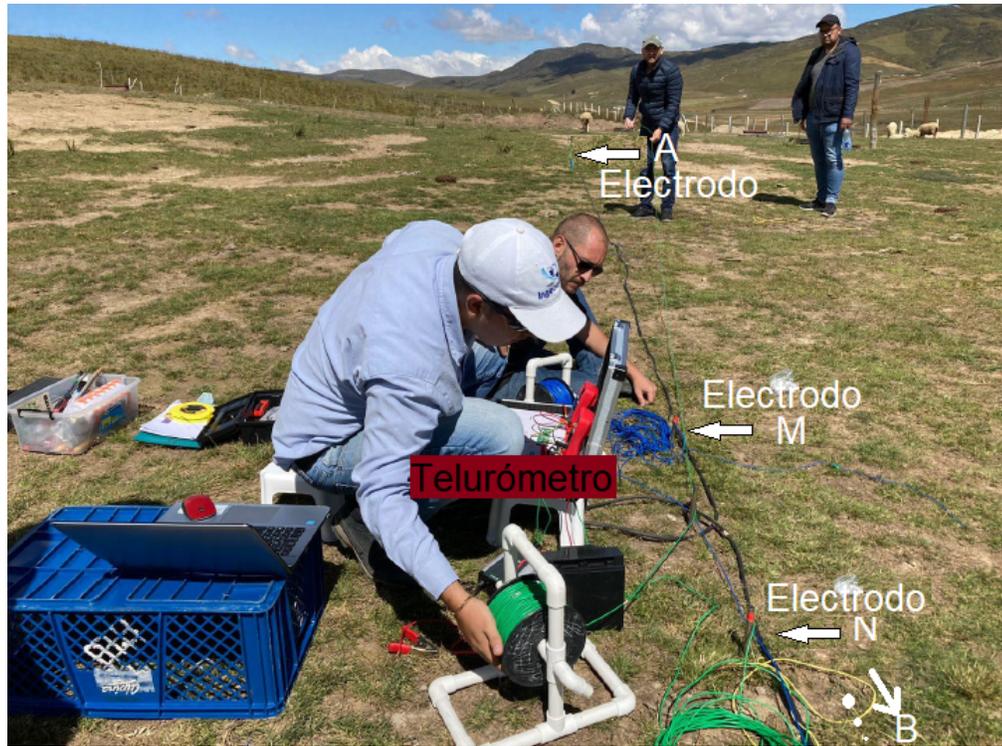


Figura 3.9: Montaje experimental para mediciones de resistividad in-situ.

### 3.2.3 Resultados y discusión

Los resultados de los sondeos eléctricos realizados en el páramo de Berlín, refugio piedra parada, permiten distinguir y caracterizar el suelo en 4 capas con un porcentaje de error menor a 3% distribuidas de la manera presentada en la Figura 3.10. Se ejecutaron dos SEV de abertura AB 15,4 m de longitud para una profundidad de investigación alcanzada de 5,13 m. 6 puntos igualmente espaciados, comenzando a partir del mayor valor de  $AB/2$ . La razón de digitalizar la curva en 6 puntos igualmente espaciados por decenas de metros, es para aumentar la velocidad de cálculo de varias curvas teóricas de sondeos, durante el proceso iterativo de ajuste [56].

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestran los resultados de las curvas obtenidas con IPI2win. En ellas podemos ver que para el sondeo número 1, la primera capa de 1 m de espesor está compuesta por gravas gruesas secas, la segunda capa 0,11 m de espesor correspondiente a una arena, la tercera capa de 1,05 m de espesor es una transición de grava gruesa y roca fracturada y la última de 0,46 m de espesor corresponde a una arena media. Para el segundo sondeo tenemos: la primera capa de 1 m de espesor está compuesta por arenas medias, la segunda capa 0,625 m de espesor correspondiente a una arena gruesa, La tercera capa de 0,3m de espesor es una transición de arena gruesa y roca fracturada y la última de 1m de espesor capa corresponde a rocas fracturadas y capas masivas.

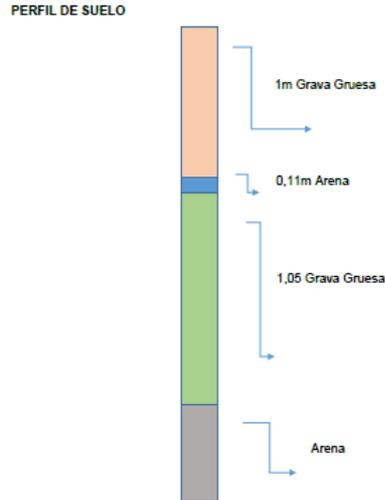


Figura 3.10: Perfil del suelo distribuido en capas. Cada profundidad de las capas es resultado del proceso de interpretación usando IPI2WIN.

### 3.3 Comentarios finales

En este capítulo, se llevó a cabo la búsqueda y caracterización de sitios potenciales para la observación de la línea de 21 cm en Colombia. Utilizando criterios de selección basados en la densidad poblacional, la ocupación del espectro radioeléctrico en la banda del FM y las precipitaciones, se identificaron siete lugares que cumplen con las condiciones adecuadas. Para validar la metodología propuesta para la caracterización de las propiedades físicas del suelo, se seleccionó el Páramo de Berlín, ubicado en las coordenadas  $7^{\circ}9'6''$  de latitud y  $72^{\circ}54'30.9''$  de longitud, previamente estudiado por la Universidad Industrial de Santander. En este lugar se realizaron las mediciones y análisis correspondientes. Los resultados de las mediciones de resistividad obtenidos en este sitio piloto fueron acordes a lo esperado, lo que ha validado la metodología planteada. Con la metodología validada, se aplicará a los otros sitios seleccionados, lo que permitirá obtener una visión más amplia y completa de las propiedades físicas de los sitios radiosilentes en Colombia. Estos hallazgos contribuirán significativamente al campo de la radioastronomía en el país y ayudarán a avanzar en el entendimiento de la línea de 21 cm. Lo anterior permite afirmar que el proyecto está bien encaminado y preparado para continuar con las etapas posteriores de investigación y desarrollo.

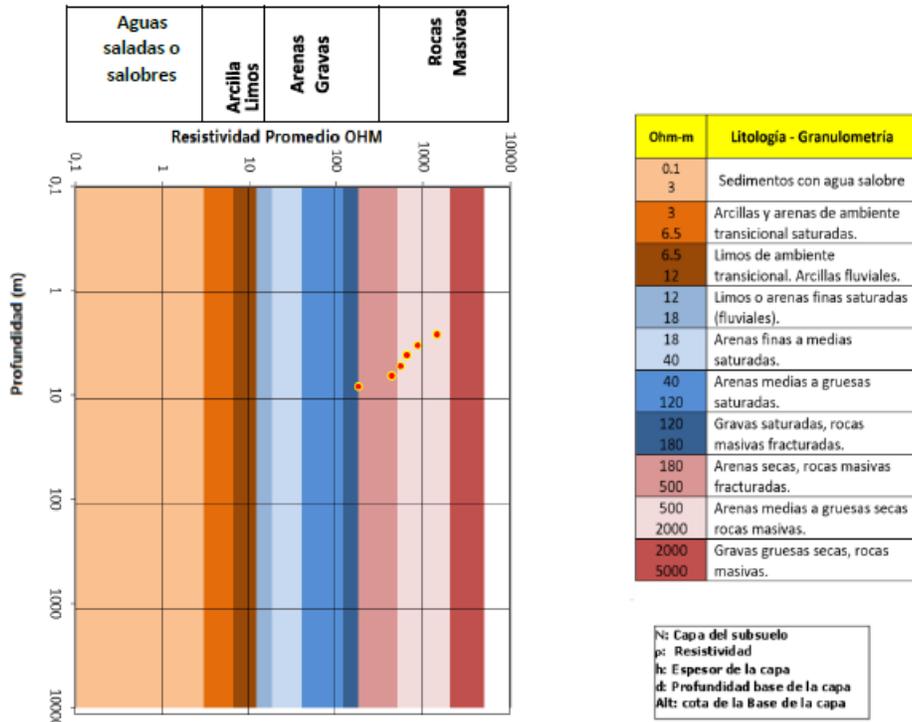


Figura 3.11: Curva de resistividades obtenida en campo para el sondeo 1.

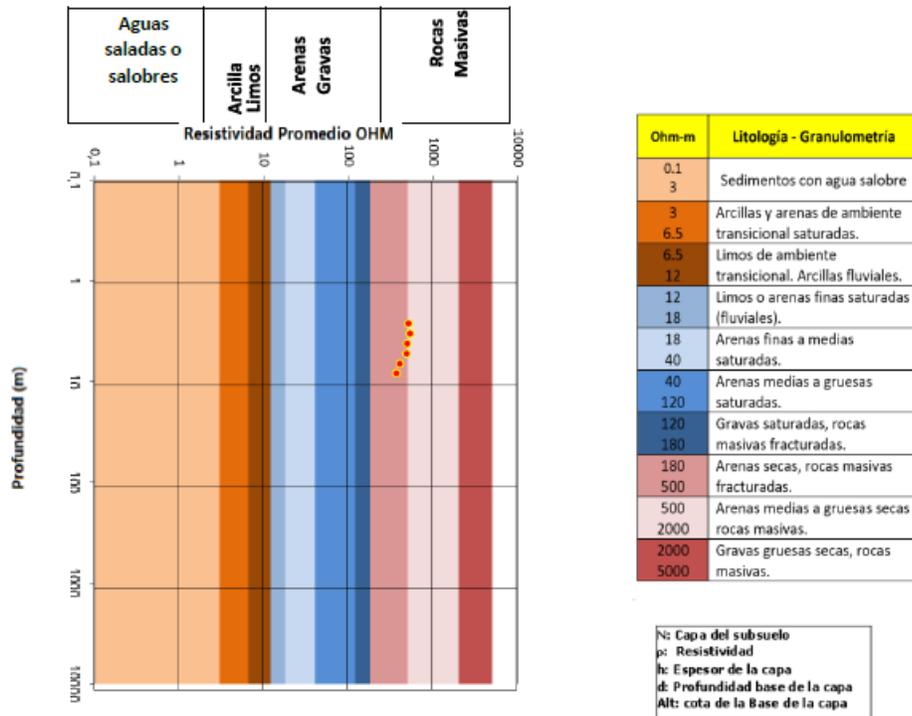


Figura 3.12: Curva de resistividades obtenida en campo para el sondeo 2.

# Capítulo 4

## Desarrollo y caracterización de antenas apropiadas para la observación de la línea de 21 cm del Hidrógeno

En este capítulo, se explora el método y la implementación del Método de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) para el diseño y optimización de antenas. En principio, se presenta el PSO como una técnica de optimización, discutiendo los principios detrás de este método y su aplicación en el diseño de antenas. Se explora específicamente el concepto de velocidad y actualización de partículas, así como la selección de hiperparámetros. Además, se describen los aspectos prácticos de la implementación del proceso PSO para la optimización de antenas, incluyendo la creación de scripts en Python y HFSS (Simulador de Estructuras de Alta Frecuencia) para facilitar la implementación del proceso de optimización. Se profundiza en la implementación específica del PSO y la definición de parámetros relevantes.

A continuación, se presenta la validación del método de optimización, discutiendo la configuración experimental y los criterios de evaluación utilizados para validar la efectividad del enfoque PSO. Se muestran los resultados obtenidos del proceso de optimización, resaltando las mejoras logradas en el rendimiento de las antenas. El siguiente apartado se centra en los requerimientos para el diseño de antenas y el proceso de optimización, específicamente en el contexto de experimentos de observación de la línea de 21 cm. Se examinan factores clave como la banda de operación de la antena, el parámetro  $S_{11}$ , el ancho de haz a media potencia y la cromaticidad de la antena. Además, se aborda la función de mérito utilizada para evaluar la calidad y el rendimiento de los diseños de antenas optimizados, así como los criterios y métricas empleados para evaluar la efectividad del método PSO.

A continuación, se presenta un estudio detallado de las antenas seleccionadas a través del proceso de optimización. Se proporciona información sobre la implementación de estas antenas y se discuten las configuraciones experimentales y las mediciones realizadas para validar su rendimiento. Finalmente, se presenta un resumen de los hallazgos clave y las conclusiones derivadas del método de optimización y el estudio de diseño de antenas.

## 4.1 Método de optimización utilizado PSO

La base del algoritmo PSO se encuentra en la metaheurística de la inteligencia de enjambre. Este comportamiento se observa en grupos de aves cuando logran alcanzar una meta a pesar del alto número de individuos diferentes, lo cual finalmente inspiró a Eberhart y Kennedy [75] a desarrollar el algoritmo. La inteligencia de enjambre se refiere a la capacidad de sistemas con múltiples individuos de coordinarse sin un control centralizado. Aunque existen diversas teorías sobre cómo logran este control descentralizado, la más aceptada sostiene que se debe a la interacción local entre los individuos, que se traduce en un comportamiento colectivo.

El algoritmo PSO se basa en este tipo de interacción social observada en las agrupaciones de aves. Se puede pensar en un individuo que busca alimento en una región, podría enfrentarse a dificultades para encontrarlo. Sin embargo, en lugar de persistir en el mismo lugar, sería más “inteligente” seguir al ave que se encuentra más cerca del alimento. Este mismo principio es seguido por el algoritmo PSO en su búsqueda de soluciones óptimas.

La población de aves se representa como un conjunto de puntos en el espacio de soluciones, conocidos como partículas. Estas partículas son evaluadas mediante una función de mérito que mide su distancia al alimento. Además, cada partícula posee una dirección y una velocidad que orienta su movimiento en el espacio de búsqueda. Dado que cada partícula tiene asignado un valor de aptitud, la mejor partícula se convierte en el líder del grupo, seguida por las demás partículas en el espacio solución.

Un elemento fundamental del proceso heurístico reside en cómo cada partícula determina su siguiente ubicación en el espacio de búsqueda. Para lograr esto, se utiliza a) su mejor posición individual y b) la mejor posición alcanzada por el grupo a nivel global. Esta actualización de las partículas está vinculada al componente de mutación del algoritmo más amplio, donde la nueva ubicación se establece mediante una función que utiliza tanto la mejor posición individual como la mejor posición globalmente obtenida.

Como algoritmo basado en poblaciones, una de las primeras tareas del PSO es inicializar la población de partículas. Esto se logra asignando de manera aleatoria las posiciones y velocidades iniciales. En concreto, cada partícula se representa mediante un vector que contiene las variables de decisión que determinan el espacio de búsqueda. En un problema de optimización de  $n$  dimensiones, cada partícula se define mediante vectores como

$$particula = X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n], \quad (4.1)$$

donde  $X$  representa una posible solución al problema de optimización. El PSO comienza generando aleatoriamente varias partículas, por lo que la población se puede ver como una

matriz de tamaño  $m \times n$ , donde  $m$  representa el tamaño de la población de soluciones factibles de la siguiente forma

$$población = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}.$$

Después de crear la población, cada partícula debe someterse a una evaluación para clasificar cuál de ellas tiene la mejor posición en el espacio de búsqueda. Se utilizan dos valores para hacer un seguimiento del rendimiento de cada partícula, conocidos como  $pbest$  y  $gbest$ ,

$$pbest = \left[ bestx_1, bestx_2, \dots, bestx_m \right],$$

y

$$gbest = \left[ global_{best}x_1, global_{best}x_2, \dots, global_{best}x_m \right],$$

El valor  $pbest$  representa la mejor posición alcanzada por cada partícula hasta el momento. Es un arreglo que registra la mejor posición individual de cada partícula a lo largo del proceso de optimización. Por otro lado, el valor  $gbest$  representa la mejor posición global entre todas las partículas de la población. Es la posición que tiene el mejor valor de aptitud o calidad en comparación con todas las demás partículas.

Durante el proceso de optimización, cada partícula actualiza su valor  $pbest$  si encuentra una posición mejor en el espacio de búsqueda. Además, se actualiza el valor  $gbest$  si alguna partícula encuentra una posición globalmente mejor que la posición almacenada previamente. Estos dos valores,  $pbest$  y  $gbest$ , son cruciales para guiar la búsqueda de soluciones óptimas en el espacio de búsqueda. Permiten que las partículas mantengan un registro de sus mejores posiciones individuales y también fomentan la comunicación y cooperación entre las partículas para buscar una mejor solución global.

Es importante tener en cuenta que las entradas  $x_i$  son valores explícitos asignados a cada variable del problema, se escriben en forma de vector para representar una posición en un hiperespacio. Como se está trabajando con un algoritmo iterativo, en cada ciclo del proceso de optimización, se actualizan los valores de  $pbest$  y  $gbest$ , lo que significa que el título de la mejor posición global puede cambiar en cada iteración. Este proceso debe detenerse cuando se logre la convergencia de todas las partículas alrededor de una posición global óptima consistente.

La convergencia se produce cuando todas las partículas se agrupan y se estabilizan en una región cercana al mejor punto global posible. Esto indica que el algoritmo ha encontrado una

solución óptima o una aproximación muy cercana a ella. La detección de la convergencia puede basarse en diferentes criterios, como el número máximo de iteraciones alcanzadas, la estabilidad de las posiciones de las partículas o la mejora mínima en el valor objetivo a lo largo de las iteraciones. Una vez que se cumple el criterio de convergencia, se detiene el proceso de optimización.

### 4.1.1 Velocidad y actualización de la partícula

Otra característica clave del algoritmo es el uso de la velocidad como método para que las partículas cambien de dirección y sigan a la mejor partícula global. Esta particularidad se puede ver como una partícula que “vuela” alrededor del espacio de búsqueda, determinada por el vector de velocidad. Este parámetro se utiliza para actualizar la siguiente posición de cada partícula mediante un cálculo basado en los valores de  $pbest$  y  $gbest$ , que representan la información disponible sobre la experiencia propia y el conocimiento del rendimiento de otros individuos.

Este cálculo tiene en cuenta la distancia relativa entre una partícula y la mejor posición global. Además, si hay una diferencia relativa significativa, se permite una alta velocidad en la dirección del mejor global para seguir rápidamente al líder. Esto no ocurre cuando la partícula está muy cerca de la mejor partícula global, en cuyo caso la velocidad debe disminuir para mantenerse cerca del mejor individuo. Como en el caso de la posición, la velocidad también es una matriz para cada partícula, en la que cada entrada es la velocidad correspondiente a cada variable del espacio  $n$ -dimensional. Así, para una partícula  $j$  su velocidad es

$$V_j = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_n]. \quad (4.2)$$

La primera aproximación a la ecuación de la velocidad debe incluir el conocimiento local y global, pero dado que la importancia relativa de estos dos factores cambia para cada variable involucrada en el problema, tiene más sentido considerar pesos aleatorios para cada factor. Por lo tanto, la velocidad puede calcularse mediante la siguiente expresión

$$\vec{v}_i(t) = \vec{v}_i(t-1) + \phi_1 rand_1 \cdot (pbest_i - \vec{X}_i(t-1)) + \phi_2 rand_2 \cdot (gbest - \vec{X}_i(t-1)), \quad (4.3)$$

en este contexto,  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son pesos aleatorios que representan el conocimiento de los estados local y global, respectivamente.  $\phi_1$  se conoce como coeficiente social, mientras que  $\phi_2$  se conoce como coeficiente de autoconocimiento. Los valores  $rand_1$  y  $rand_2$  son generados aleatoriamente en cada iteración. Siendo estos hiperparámetros para asignar un peso específico al conocimiento previo individual o social, de ahí que el diseñador pueda poner más o menos énfasis en cada uno de estos factores. El parámetro  $t$  equivale al número de iteración demarcando el estado actual del proceso de optimización. El término  $\vec{X}_i(t-1)$ , corresponde al estado en que se encontraba la partícula anterior. Por último, estos números aleatorios son muestreados a partir de una distribución uniforme entre 0 y 1.

El primer componente de la suma en la ecuación 4.3 se conoce como inercia o momento. Modela la tendencia a continuar en la misma dirección para cada partícula. La segunda componente describe una atracción hacia la mejor posición individual que se denomina memoria o auto-conocimiento. Por último, el tercer componente es una atracción hacia la mejor posición global que se conoce como conocimiento social.

En cuanto a la actualización de la partícula, es un proceso dependiente del cálculo de la velocidad que permite obtener una nueva posición como,

$$\vec{X}_i(t) = \vec{X}_i(t-1) + \vec{v}_i(t). \quad (4.4)$$

Desde el punto de vista algorítmico, estas funciones dependen del tiempo, lo que equivale a pasos de iteración, por lo que cada estado actual depende de las posiciones y velocidades anteriores.

### 4.1.2 Selección de los hiperparámetros

Los hiperparámetros son parámetros externos al proceso de optimización que deben ajustarse antes de que el algoritmo comience a procesar los datos. A diferencia de los parámetros del modelo que se ajustan durante el proceso de entrenamiento, los hiperparámetros influyen en el comportamiento y el rendimiento del método, pero no se aprenden directamente del conjunto de datos. Para implementar adecuadamente el algoritmo PSO, es crucial tener en cuenta diversos factores que favorezcan la convergencia y eviten problemas como la explosión del enjambre. Estas consideraciones se traducen en un conjunto de parámetros de configuración que deben seleccionarse cuidadosamente para obtener un desempeño óptimo del algoritmo.

En relación a los factores de atracción e inercia (descritos en ec 4.3), se han propuesto soluciones por Eberhart [75], Van Den Bergh [76] y Clerc [77]. En estas soluciones, los valores para  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son asignados dinámicamente, ya sea mediante el uso de números generados aleatoriamente para introducir caos en el sistema o mediante una fórmula que limita los valores de velocidad. Estos factores, junto con otros parámetros como el tamaño del enjambre, el número máximo de iteraciones y la tolerancia de convergencia, deben ser ajustados y calibrados adecuadamente para cada problema específico. La elección de estos parámetros es crucial para lograr un equilibrio entre la exploración y la explotación del espacio de búsqueda, permitiendo que el PSO converja hacia soluciones óptimas de manera eficiente. Es importante destacar que la selección de los valores de los parámetros de configuración es un proceso iterativo y depende del conocimiento del problema, la experiencia del usuario y la observación de los resultados obtenidos durante las ejecuciones del algoritmo.

Finalmente, se debe establecer el límite de velocidad. La selección de este parámetro no es tan sencilla como se podría pensar debido a la falta de conocimiento sobre qué elección es la mejor. Además, si se utiliza un factor de inercia dinámico, el límite de velocidad también debe variar a lo largo del proceso iterativo. Por otro lado, se debe establecer un límite de velocidad para cada variable involucrada en nuestro problema de optimización, por lo que el límite de velocidad es

un vector n-dimensional, no solo un valor único para gobernar la dinámica de cada partícula. Una elección común es utilizar el rango disponible de cada variable para establecer la velocidad dentro de esos límites. Por ejemplo, si una variable  $x_1$  tiene un  $x_{1max} = 10$  y  $x_{1min} = 3$ , su rango dinámico es de 7, por lo tanto, la velocidad se mantiene dentro de ese rango según:

$$V_{max} = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}. \quad (4.5)$$

## 4.2 Creación de un script en Python y HFSS para la implementación del proceso de optimización

Para lograr una optimización efectiva, el algoritmo PSO se apoya en un enfoque de optimización global que implica un preproceso para establecer los límites del espacio de soluciones a explorar, los cuales actúan como hiperparámetros. A través de un proceso iterativo, estos límites se ajustan al agregar información de grupos de optimización anteriores. En ciertos momentos, se consideran otros algoritmos como suboptimización, lo que permite una selección más rápida, aunque menos precisa, del espacio de soluciones factibles. Este enfoque puede ser automatizado y codificado, o aplicado de forma "manual" mediante la revisión y el análisis de los resultados de la optimización para ajustar los parámetros de manera más adecuada.

En el centro de esta técnica se encuentra un concepto clave que representa una aproximación básica del modelo a optimizar, el cual está compuesto por tres vectores: el modelo nominal y los rangos máximo y mínimo. Cada diseño de antena se describe mediante un vector nominal que contiene las dimensiones físicas necesarias para reproducirlo en cada punto durante el proceso de optimización (ver Fig. 4.1). Es importante tener en cuenta que este modelo auxiliar no necesita cumplir todos los requisitos del problema, sino que se utiliza para buscar una versión optimizada del modelo de antena. Este modelo se describe mediante un vector que abarca la información  $n$ -dimensional del problema de optimización. En este contexto, los límites definidos durante el preproceso actúan como hiperparámetros que influyen en el comportamiento y el rendimiento del algoritmo PSO.

Existen varias formas de escribir un vector que podría representar nuestra geometría dependiendo de los atributos del modelo inicial. Por ejemplo, si se considera una antena donde sus dimensiones físicas se describen según la figura 4.1 un vector para describir la geometría podría tener la siguientes forma

$$\text{antena} = [L, W, H].$$

Si, en cambio se considera la separación entre los paneles (Gap) que conforman el dipolo, podemos escribir el vector como

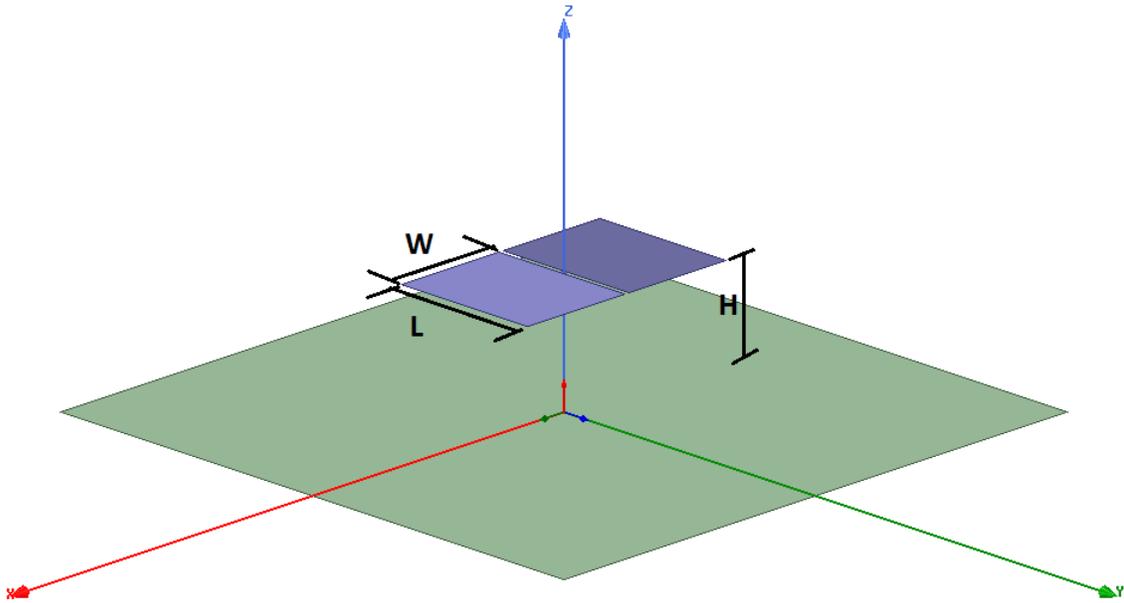


Figura 4.1: Esquemático antena dipolo blade.

$$\text{antena} = [L, W, H, \text{Gap}].$$

Los rangos máximo y mínimo también se codifican en forma de vector. Estos vectores se convierten en el objeto clave para poner todo el conocimiento adquirido en cada grupo de optimización. Por ejemplo, un vector máximo para nuestra antena propuesta toma la forma:

$$\text{antena} = [L_{max}, W_{max}, H_{max}],$$

$$\text{antena} = [L_{max}, W_{max}, H_{max}, \text{Gap}_{max}],$$

y el vector mínimo como:

$$\text{antena} = [L_{min}, W_{min}, H_{min}],$$

$$\text{antena} = [L_{min}, W_{min}, H_{min}, \text{Gap}_{min}].$$

Los vectores mencionados anteriormente desempeñan un papel clave en el establecimiento del límite hiperdimensional, ya que marcan las regiones del espacio de búsqueda. A medida que

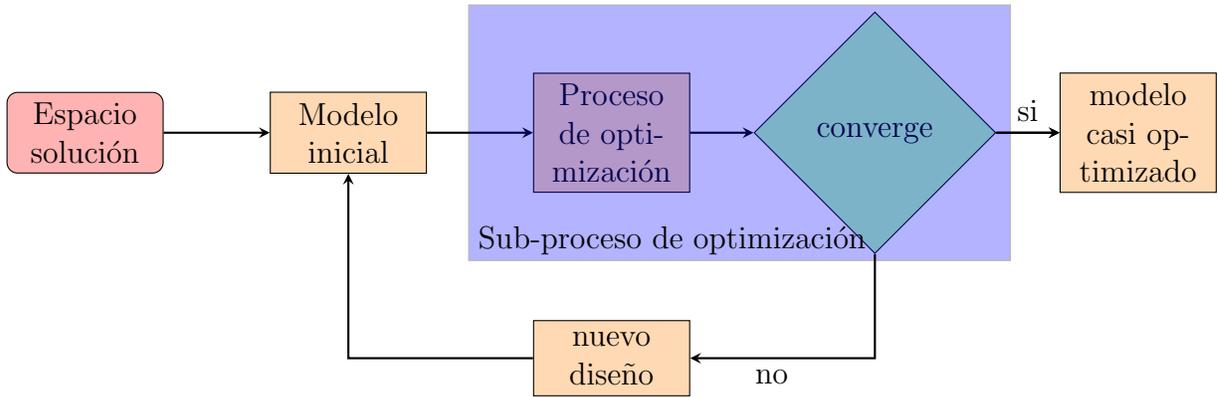


Figura 4.2: Diagrama de flujo del sub-proceso de optimización.

refinamos la selección de porciones de este espacio, nos acercamos a mínimos globales, como se ilustra en la Figura 4.2. Para lograr esto, el proceso de optimización comienza con un modelo inicial que se somete a una suboptimización mediante el algoritmo PSO, generando un diseño de antena resultante después de un conjunto completo de optimización y reduciendo el costo computacional del proceso. Una vez que los límites están definidos, delimitan el espacio de muestreo donde se llevará a cabo el proceso principal del algoritmo PSO.

Posteriormente, el proceso de optimización sigue su curso, como se ilustra en la Figura 4.3. Para implementar el PSO, es necesario evaluar cada problema de optimización con precisión para comprender cómo se aplica cada paso. Por ejemplo, en el caso de optimizar un sistema electromagnético, como las antenas, los problemas de optimización podrían incluir mejorar el ancho de banda de la antena, aumentar la directividad, optimizar la radiación en ciertas direcciones o mejorar la cromaticidad, entre otros aspectos específicos del rendimiento electromagnético. Estos objetivos pueden requerir el cálculo de métricas y medidas de rendimiento particulares para cada diseño de antena propuesto por el algoritmo PSO. Como el lector puede notar, estas medidas de rendimiento varían de un problema a otro, y la función de mérito también será diferente según los objetivos de optimización planteados. En cuanto a los dispositivos electromagnéticos y de microondas, el diseñador tiene dos alternativas: a) desarrollar un modelo analítico del dispositivo y codificar su propia herramienta de simulación, o b) utilizar un software comercial especializado en simulación electromagnética para evaluar el rendimiento de los diseños propuestos.

En este proyecto, se adoptó el segundo enfoque utilizando el software de simulación ANSYS HFSS. El software proporciona una interfaz que permite a los usuarios ejecutar scripts de Python para compartir información de ida y vuelta, además, permite un control externo de ejecución que en nuestro caso es muy conveniente para gestionar el lanzamiento de cada simulación y recibir informes específicos como el parámetro  $S_{11}$  y los patrones de radiación.

El proceso de optimización se divide en dos etapas. La primera etapa se realiza en los primeros pasos del proceso de optimización, como se muestra en la Figura 4.3. Consiste en una sola iteración a través de todas las partículas generadas aleatoriamente para someter cada una de ellas al proceso de simulación y, consecuentemente, recibir los datos de rendimiento electromagnético. La información obtenida se comparte de vuelta al algoritmo en archivos "csv" que se utilizan para calcular la medida de desempeño de cada partícula. Esta medida de desempeño proporciona una clasificación de las partículas y permite identificar la mejor posición global e individual. Finalmente, se calculan las velocidades para obtener las nuevas posiciones de las partículas.

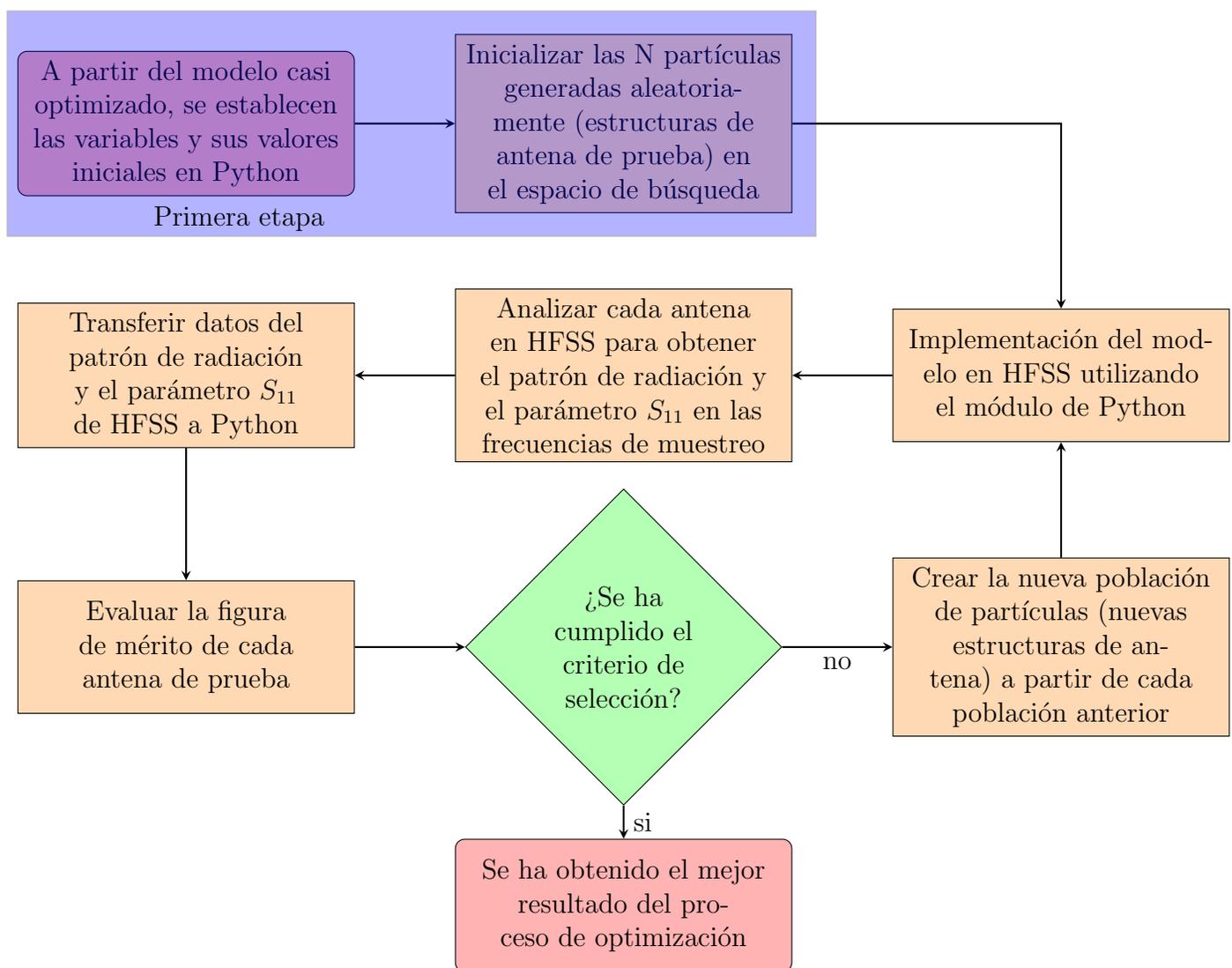


Figura 4.3: Diagrama de flujo del proceso de optimización.

La segunda etapa es un proceso iterativo de ejecuciones recurrentes de simulación, evaluación, selección y actualización de partículas. Es durante este proceso que tiene lugar la optimización mediante un ciclo continuo de mutación y aplicación de los principios del PSO, que finaliza ya sea agotando el número de iteraciones preestablecidas o encontrando un punto de convergencia.

### 4.2.1 Implementación de PSO

La programación orientada a objetos (POO) se ha vuelto una de las características más importantes en los lenguajes de programación actuales. Aunque se menciona con frecuencia, rara vez se utiliza de manera consciente, ya que se aplica de manera predeterminada en muchos entornos de trabajo. Recordemos que la idea principal de la POO es encapsular estructuras de datos y procedimientos en entidades separadas que pueden tratarse como objetos. Estos objetos se pueden instanciar en entidades secundarias, lo que permite replicar las características del objeto principal.

El algoritmo PSO tiene un componente particular que se adapta perfectamente al paradigma de la programación orientada a objetos, y es la característica basada en poblaciones. En esta investigación, se desarrolló dos objetos principales para implementar una versión robusta del PSO: las clases Swarm (Enjambre) y Particle (Partícula). Estas abstracciones básicas permitieron una solución que genera y replica fácilmente partículas.

El uso de este paradigma de programación ofrece numerosos beneficios. Por ejemplo, en un entorno de procesamiento distribuido (cluster), es posible ejecutar múltiples instancias del PSO de forma simultánea y tener varios hilos de optimización trabajando al mismo tiempo.

Esta estructura propuesta presenta varias ventajas, especialmente en cuanto a la trazabilidad y gestión del proceso de optimización. Existe una relación clara entre el enjambre (swarm) y la población de partículas, ya que la población se trata como una matriz de partículas. Además, podemos rastrear el comportamiento global del algoritmo PSO mediante las variables *gbest*, *pbest* y *pg*. En cuanto a las partículas, se pueden reproducir de manera consistente y cada una tiene un identificador único generado aleatoriamente para poder rastrearla durante todo el proceso de optimización.

### 4.2.2 Definición de los parámetros

En la sección 4.1.2 se presentó una introducción a los hiperparámetros del PSO y su selección basada en hallazgos a partir de sub-procesos de optimización previos. A continuación se describe brevemente el conjunto actual de hiperparámetros y cómo se aplicó el proceso de ajuste a nuestro problema de optimización específico.

En un problema de optimización computacionalmente factible en el que el proceso de simulación

Tabla 4.1: Hiperparámetros usados para la implementación de PSO.

Parametro	Simbolo	valor
Velocidad máxima	$V_{max}$	Dinámico (ver ec. 4.5)
Coefficiente social	$\phi_2$	2.1
El coeficiente de autoconocimiento	$\phi_1$	2.0

es relativamente rápido, en el rango de 0.1~10 segundos, el tamaño de la población puede ser del orden de cientos de partículas, mientras que el número de iteraciones puede estar en el rango de 50~100. En una situación como esta, hay suficiente margen para que ocurra la convergencia, pero, como ocurre en este caso, una sola simulación de partícula puede llevar fácilmente ~150 segundos, lo que limita los recursos computacionales y, por lo tanto, impone límites al número de partículas y a las iteraciones. En este proceso de simulaciones iniciales, cada ejecución podría tomar alrededor de 30 iteraciones con una población de 10~15 partículas, pero bajo esas condiciones, se tuvo que contar con un control de convergencia. Se determinó que esto se podía lograr utilizando la ecuación de velocidad ec(4.3) y los parámetros  $\phi_1$  y  $\phi_2$  adecuados. Estos parámetros proporcionaron una herramienta para tener control sobre el tiempo de convergencia.

Los valores de  $\phi_1$  y  $\phi_2$ , que se obtuvieron mediante una evaluación empírica, se presentan en la tabla 4.1. Aunque muchos investigadores respaldan un valor de 2 para ambos parámetros, decidimos explorar el impacto de utilizar una relación diferente entre ellos. Inicialmente, realizamos una prueba asignando un mayor peso al factor social, utilizando valores de  $\phi_1 = 10$  y  $\phi_2 = 2.0$ . Sin embargo, esta configuración resultó en que la primera solución global propuesta no permitiera a otras partículas explorar el espacio de búsqueda, lo cual es un comportamiento indeseado. En un escenario ideal, la mejor partícula global debe permitir que otros individuos mejoren su comportamiento y compitan para alcanzar la mejor posición global. Al cambiar el énfasis a favor del mejor rendimiento individual, las partículas tendían a seguir su mejor valor histórico, lo que resultaba en un tiempo de convergencia muy largo, si es que ocurría en algún momento. En consecuencia, el mejor rendimiento coincidió con lo sugerido por la literatura [91, 92], con una pequeña diferencia en los parámetros sociales, lo que proporcionó un impulso adicional para que las partículas siguieran a la mejor partícula global. Finalmente, impusimos el límite de velocidad utilizando la ecuación (4.5).

Una versión completamente funcional del código se puede encontrar en este repositorio de GitHub ([https://github.com/ERA-2022/PSO\\_for\\_hybrids\\_and\\_antennas](https://github.com/ERA-2022/PSO_for_hybrids_and_antennas)). El usuario debe tener una versión completamente operativa del software comercial ANSYS HFSS para realizar las simulaciones durante el proceso de optimización.

### 4.3 Validación del método

Para validar el algoritmo, se llevó a cabo un proceso de optimización utilizando una geometría de antena previamente estudiada, específicamente, el diseño de antena dipolo blade presentado

por el grupo EDGES para la banda de frecuencia de 100 a 200 MHz. Esta antena consiste en dos paneles rectangulares alimentados entre las dos láminas [61]. El objetivo era mejorar la dispersión de la ganancia en los planos  $\phi = 0$  y  $\phi = 90$ , ya que esta característica es esencial para el diseño de antenas destinadas a la detección de la señal de 21 cm.

El proceso de optimización se realizó iterativamente mediante el algoritmo PSO, utilizando la función de mérito para evaluar la calidad de cada diseño de antena propuesto. Se utilizaron diferentes valores para los parámetros  $\phi = 0$  y  $\phi = 90$ , que son los pesos aleatorios para el conocimiento de los estados local y global en el algoritmo PSO. Se realizaron pruebas con diferentes combinaciones de estos parámetros, incluyendo asignar un peso mayor al factor social  $\phi_1$  en comparación con el factor de autoconocimiento  $\phi_2$ . Sin embargo, esta configuración resultó en que la primera solución global propuesta no permitía que otras partículas exploraran adecuadamente el espacio de búsqueda, lo cual no era deseable.

Se observó que, para obtener un comportamiento más eficaz, era necesario mantener un equilibrio entre el factor social y el de autoconocimiento. Por lo tanto, se ajustaron los parámetros  $\phi_1$  y  $\phi_2$  de acuerdo con la literatura, con una pequeña diferencia en los valores, lo que proporcionó un impulso adicional para que las partículas siguieran a la mejor partícula global.

El diseño final optimizado logró una reducción significativa en la dispersión de la ganancia en los planos  $\phi = 0$  y  $\phi = 90$ , lo que demuestra la eficacia del algoritmo y la función de mérito utilizados. También se pudo confirmar que el algoritmo mejoró de manera efectiva los resultados obtenidos en otros diseños de antena. Durante el proceso de optimización, se hizo hincapié en mantener un equilibrio adecuado entre los factores sociales y de autoconocimiento, lo cual resultó crucial para obtener buenos resultados.

Estos resultados validaron la solución factible para nuestro problema de optimización y demostraron la aplicabilidad exitosa del algoritmo en diversas bandas de frecuencia. La estructura del vector de partículas se definió basándose en la geometría presentada en la Figura 4.1, donde cada entrada representa un parámetro geométrico libre. De esta manera, el vector proporcionado a HFSS a través de la interfaz adoptó la siguiente forma

$$\text{antena} = [\text{W}, \text{L}, \text{H}, \text{Gap}]. \quad (4.6)$$

Las variables W y L representan el ancho y largo de los paneles de la antena, respectivamente. La variable H se refiere a la altura de los paneles con respecto al plano tierra, y Gap indica la longitud de la alimentación de la antena. Durante el proceso de simulación, se ha considerado que el tamaño del plano tierra es infinito y está hecho de un material conductor perfecto.

### 4.3.1 Resultados del proceso de optimización

En la figura 4.4 se presenta el resultado de la simulación de la dispersión de la ganancia antes de aplicar el proceso de optimización. Se puede observar que la ganancia de la antena se distribuye

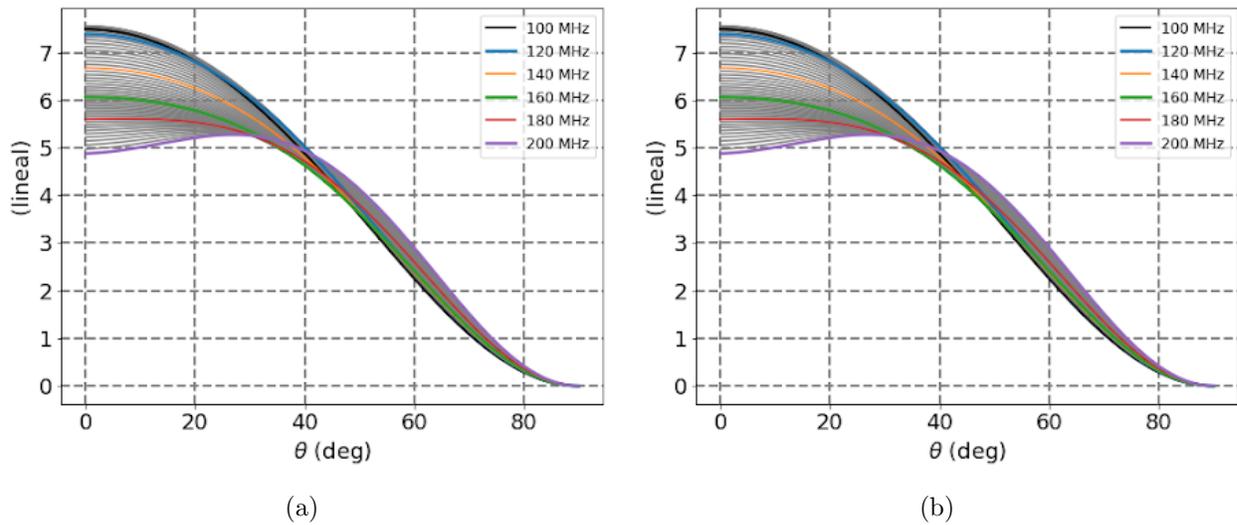


Figura 4.4: Dispersión del patrón de radiación de la antena en el rango de frecuencias de 100–200 MHz antes del proceso de optimización. a) plano  $\phi = 90^\circ$ . b) plano  $\phi = 0^\circ$ .

en un rango de 4.8 dB a 7.6 dB para los planos  $\phi = 0$  y  $\phi = 90$ .

En contraste, la figura 4.5 muestra la dispersión después de aplicar el proceso de optimización presentado en secciones anteriores. En esta figura, se puede apreciar que la dispersión de la ganancia se reduce a un rango de 7.1 dB a 7.9 dB, lo que indica una disminución en la dependencia de la ganancia de la antena con la frecuencia. Este resultado demuestra que se ha reducido la dispersión en un 71% en comparación con la antena sin optimización. El rango de distribución de la ganancia obtenido muestra una menor cromaticidad de la antena, lo que indica que el proceso de optimización ha cumplido su objetivo.

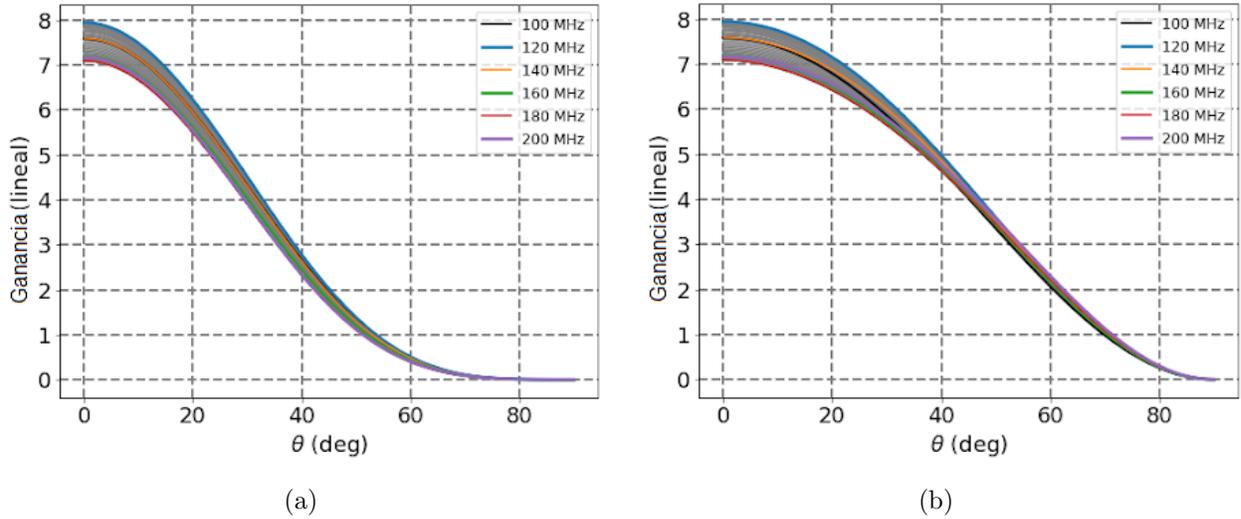


Figura 4.5: Dispersión del patrón de radiación de la antena en el rango de frecuencias de 100–200 MHz después del proceso de optimización. a) plano  $\phi = 90^\circ$ . b) plano  $\phi = 0^\circ$ .

## 4.4 Requerimientos para el diseño de la antena y del proceso de optimización

### 4.4.1 Banda de operación de la antena

La banda de frecuencia de operación debe ser consistente con el rango esperado de corrimiento al rojo/frecuencia del espectro de línea cosmológica de 21 cm. Por lo tanto, hemos seleccionado el rango de frecuencia de 50 a 100 MHz correspondiente a  $30 < z < 13$ .

### 4.4.2 Parámetro $S_{11}$

La antena necesita tener un coeficiente de reflexión bajo para acoplar eficientemente la señal con el resto del instrumento. Tradicionalmente, el ancho de banda se establece como el rango de frecuencia en el que  $S_{11}$  está por debajo de  $-10$  dB. Esto garantiza una alta ganancia de antena y una respuesta de frecuencia plana en todo el ancho de banda. Dado que también pretendemos optimizar la frecuencia central y la cromaticidad, hemos elegido relajar el límite de  $S_{11}$  a  $-8$  dB para facilitar que el algoritmo logre un compromiso entre los dos parámetros optimizados.

Compensamos este cambio de límite manteniendo las pérdidas resistivas bajas en otros subsistemas del instrumento. En el caso del dipolo, la principal contribución a las pérdidas resistivas proviene de la longitud del cable que conecta los paneles de la antena y el receptor, que se puede mantener lo más corto posible. Además, el instrumento incorporará un acoplador balun antena-receptor que limita la corriente de modo común y, por lo tanto, reduce las pérdidas de ROE.

### 4.4.3 Ancho de haz a media potencia

Los requisitos científicos en el rango de longitud de onda restringen los experimentos de antena única a antenas de haz amplio y baja resolución, como los dipolos. En este caso una antena de baja resolución es aquella que posee un ancho de haz a media potencia  $> 30^\circ$ . Una antena de haz amplio puede observar una gran área del cielo cuando se apunta el patrón de radiación hacia el cenit ( $\theta < 60$  grados), al mismo tiempo que se intenta evitar la interferencia de radiofrecuencia (RFI) y la emisión del suelo. Este requisito es necesario en todas las frecuencias estudiadas. Cualquier ventaja obtenida al utilizar un conjunto de antenas para crear un haz más estrecho se equilibra con el mayor costo y complejidad requeridos para el modelado [80]. Por estas razones, este estudio se centra en el diseño de antenas de haz amplio.

### 4.4.4 Cromaticidad de la antena

Los efectos de la cromaticidad de la antena deben minimizarse. Para examinar la cromaticidad de la ganancia del haz de la antena [61], calculamos la derivada de la ganancia del haz con respecto a la frecuencia sobre la cuadrícula  $((\nu_i, \theta_j))$  [78] en cada  $\phi = 0^\circ$  and  $\phi = 90^\circ$  para obtener el Cambio de Ganancia del Haz (BC, por sus siglas en ingles) como

$$BC = \left( \frac{\Delta G}{\Delta \nu} \right)_{i,j} = \frac{G(\nu_{i+1}, \theta_j) - G(\nu_i, \theta_j)}{\nu_{i+1} - \nu_i}. \quad (4.7)$$

Con el fin de cuantificar mejor esta evaluación a partir de nuestras simulaciones, utilizamos un Cambio Normalizado de la Ganancia del Haz Punto a Punto (NBC, por sus siglas en ingles) definido como,

$$NBC_{i,j} = \frac{\left( \frac{\Delta G}{\Delta \nu} \right)_{i,j}}{\overline{G}_{i,j}} * 100\%, \quad (4.8)$$

donde  $\overline{G}_{i,j} = \frac{1}{2} [G(\nu_i, \theta_j) + G(\nu_{i+1}, \theta_j)]$ . Luego, tomamos la raíz cuadrada de la media cuadrática (RMS) de la cuadrícula NBC como un parámetro “proxy” para estimar la cromaticidad total calculada en todo el rango de frecuencia y ángulo cenital que va desde 0 hasta 90 grados para obtener  $RMS_{NBC}$  en cada uno de los planos  $\phi = 0^\circ$  y  $\phi = 90^\circ$ . Uno de nuestros principales objetivos de optimización es, por lo tanto, minimizar el  $RMS_{NBC}$  del mapa de haz para validar las antenas candidatas para observaciones globales de la línea de 21 cm.

## 4.5 Función de mérito

El algoritmo PSO utiliza una figura de mérito (FoM),  $f(x)$ , que se debe minimizar sobre los valores de un vector  $x$  conformado por los parámetros geométricos que se van a variar. La

FoM debe depender de las características deseadas requeridas para la antena. En este caso, utilizamos una FoM que permite optimizar  $S_{11}$  y la cromaticidad. Definimos la FoM como

$$f(\vec{x}) = w_1 \times \text{RMS}_{\text{BC}} + w_2 \left( \frac{\text{BW}_{S_{11}} - \text{BW}_{\text{ideal}}}{f_c} \right)^2, \quad (4.9)$$

donde  $\text{BW}_{S_{11}}$  es el ancho de banda a  $-8$  dB del parámetro  $S_{11}$  en función de la frecuencia.  $\text{BW}_{\text{ideal}}$  es el ancho de banda deseado (80 MHz) y  $f_c$  es el valor de la frecuencia central.  $w_1$  y  $w_2$  son coeficientes de ponderación ajustados para obtener los resultados deseados. Se seleccionaron los valores  $w_1 = 0.8$  y  $w_2 = 0.2$  para equilibrar las contribuciones de la cromaticidad del haz y las reflexiones de impedancia de la antena. Finalmente,  $\text{RMS}_{\text{BC}}$  corresponde a la RMS del cambio en la ganancia del haz  $(\Delta G/\Delta \nu)_{i,j}$  sin normalización en función de la frecuencia y el ángulo cenital para ahorrar tiempo computacional. Sin embargo, la cantidad que utilizamos para el análisis de la cromaticidad del haz es  $\text{RMS}_{\text{NBC}}$ .

## 4.6 Estudio de antenas seleccionadas

En la sección 2.4 se presentaron los resultados de los parámetros  $S_{11}$  y ganancia para diferentes tipos de antenas, incluyendo antenas monopolo tipo G y blade, así como antenas dipolo tipo blade y corbatín. A través de ese estudio preliminar, se pudo realizar una evaluación general para determinar cuales de estas antenas pueden ser propuestas como posibles candidatas para la observación de la línea de 21 cm.

Analizando los resultados de simulación de la ganancia y del parámetro  $S_{11}$ , se concluyó que las antenas dipolo son las mejores candidatas. Estas antenas muestran que su haz de radiación está orientado hacia el cenit, un requisito fundamental para este tipo de experimentos. Además, tienen un ancho de banda más amplio en comparación con las antenas monopolo propuestas. Basándonos en estas consideraciones, se decidió estudiar en detalle los modelos de antenas tipo dipolo blade y corbatín.

Se comenzó escalando las dimensiones físicas de la antena descrita en la sección 4.3 en un factor de 2 para cubrir la banda entre 50-100 MHz. Un esquemático de esta antena se muestra en la Figura 4.6a. La antena de tipo corbatín es una variación de la antena blade en la que cada panel tiene un ángulo oblicuo. Este ángulo se forma al incluir una nueva longitud (L2) en la geometría de la antena de blade (Fig. 4.6b). Definir la estructura de la antena con un ángulo oblicuo es una forma de lograr un ancho de banda más grande [35]. Además, este ángulo oblicuo podría mejorar la cromaticidad de la antena.

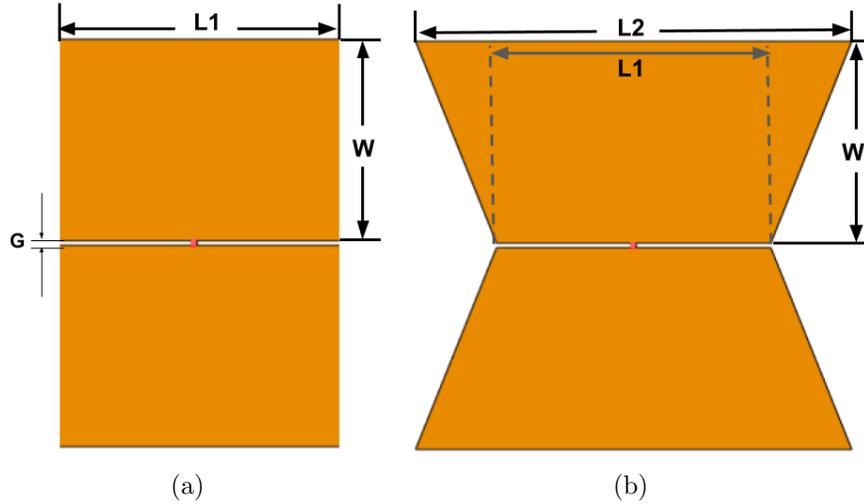


Figura 4.6: Esquemático de las antenas blade y corbatín.

Las dos antenas se han pasado por la metodología de optimización propuesta anteriormente. Todas las dimensiones físicas de las antenas, incluyendo el grosor de los paneles, fueron optimizadas con el fin de lograr un ancho de banda amplio y un haz lo más acromático posible. El tamaño del plano tierra fue el único parámetro fijo. Las dimensiones originales y optimizadas obtenidas tanto para la antena blade como para la antena corbatín se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Dimensiones físicas de las antenas blade y corbatín originales y optimizadas. Todas las antenas tienen un plano tierra de  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ .

Dimensiones físicas	Blade		Corbatín	
	original (m)	Optimizada (m)	original (m)	Optimizada (m)
W	0.98	1.10	1.00	1.10
L1	1.26	1.35	1.22	1.32
L2	NA	NA	2.10	1.80
G	0.04	0.02	0.04	0.02
t	0.006	0.006	0.006	0.006
H	0.75	0.78	0.60	0.80

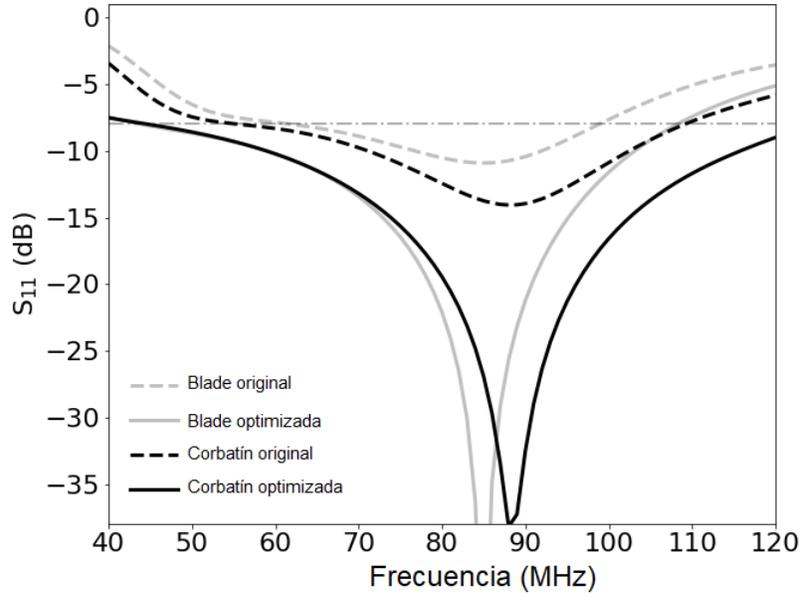


Figura 4.7: Parámetro  $S_{11}$  para las antenas blade y corbatín en la banda de 40 - 120 MHz.

En la Figura 4.7 se compara el parámetro  $S_{11}$  simulado de las antenas original y optimizadas. Se puede observar que las antenas optimizadas tienen un ancho de banda mayor que las antenas originales. Este resultado muestra que se logra un rendimiento deseable del parámetro  $S_{11}$ . Por ejemplo, la antena corbatín optimizada muestra un ancho de banda de 78 MHz que, en comparación con las otras antenas, cumple con el requisito de diseño. Además, el nivel de coincidencia cerca de los 80 MHz es mejor que en las antenas originales.

La Figura 4.8 muestra el patrón de radiación de las antenas blade y corbatín. Es notable que el ancho del haz del patrón de radiación para el plano  $\phi = 0$  es mayor que para el plano  $\phi = 90$ . Además, las antenas optimizadas muestran que la dispersión de ganancia en el rango de frecuencia estudiado es menor. También se calcula el  $RMS_{NBC}$  de la derivada del patrón de radiación de las antenas antes y después de la optimización. La antena corbatín optimizada presenta valores más bajos de  $RMS_{NBC}$ , lo que significa que tiene una ganancia más uniforme que las otras geometrías. Además, el proceso PSO disminuye la cromaticidad en casi un 40% en todos los casos. La Tabla 4.3 resume estos resultados.

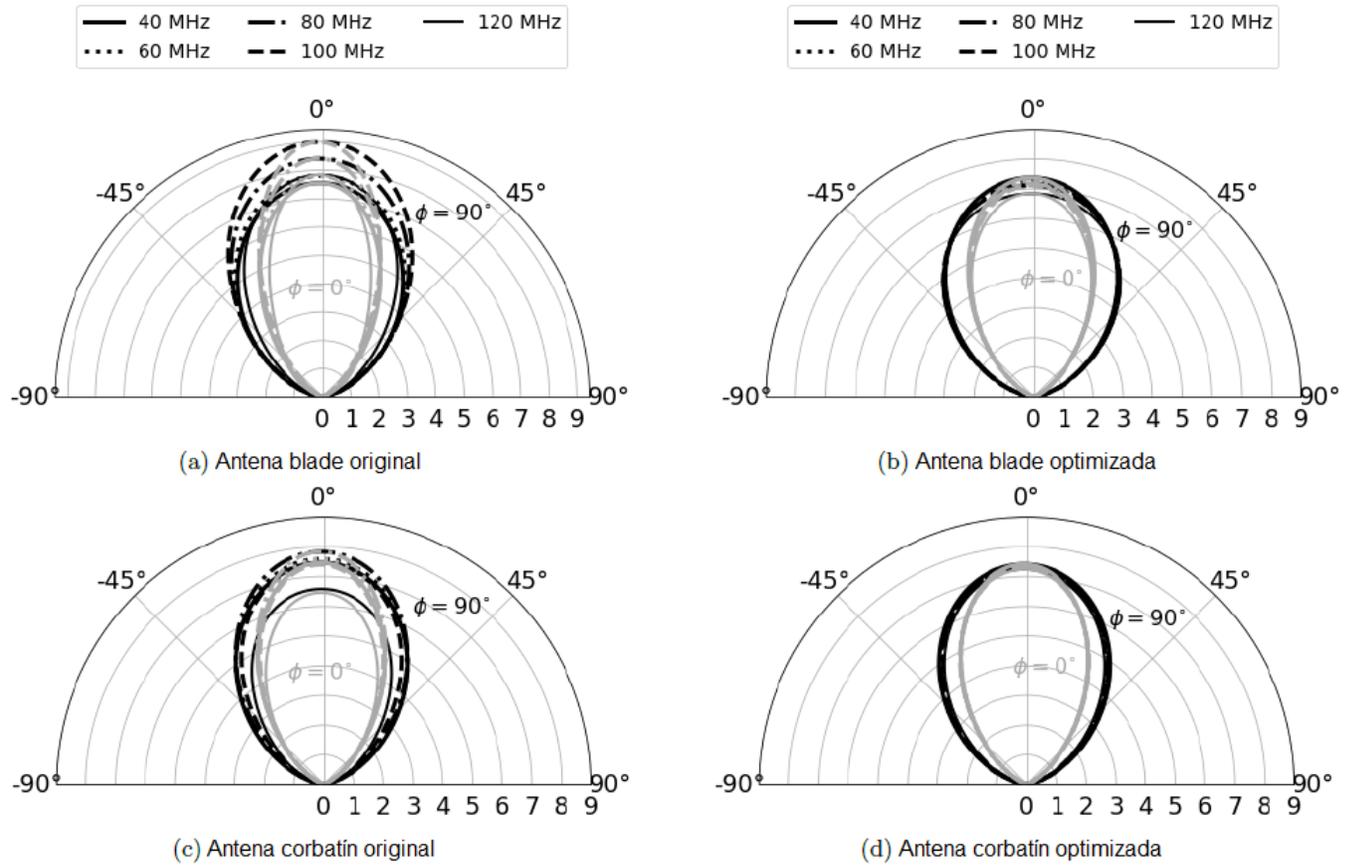


Figura 4.8: Patrones de radiación originales (a, c) y optimizados (b, d) para las antenas blade y corbatín. La ganancia se muestra en una escala lineal. El plano  $\phi = 90^\circ$  corresponde a cortes a lo largo del eje de excitación de las antenas dipolo blade y corbatín (plano E). El plano  $\phi = 0^\circ$  corresponde a cortes a lo largo del eje perpendicular (plano H).

Tabla 4.3: Resultados del proceso de optimización para los parámetros ancho de banda y cromaticidad de las antenas blade y corbatín originales y optimizadas.

Parámetro	Blade		Corbatín	
	Original	Optimizada	Original	Optimizada
BW a $-8\text{dB}$ (MHz)	34.12	64.26	41.27	76.81
BW a $-10\text{dB}$ (MHz)	25	48	36	58
BW fraccional a $-10\text{dB}$ (%)	31	60	45	72
$\text{RMS}_{\text{NBC}}$ (por MHz)( $\phi = 0$ )	0.81 %	0.42 %	0.77 %	0.41 %
$\text{RMS}_{\text{NBC}}$ (por MHz)( $\phi = 90$ )	1.05 %	0.63 %	0.98 %	0.58 %

### 4.6.1 Implementación de las antenas

Para verificar el proceso de optimización y las simulaciones, se construyeron tres antenas en el rango de 1-2 GHz: la antena original, la antena optimizada y la antena en forma de corbatín. Con el fin de ajustar el rango de operación de las antenas a 1–2 GHz, se realizó un escalamiento de las dimensiones físicas de  $W$ ,  $L1$ ,  $L2$  y  $H$  en una proporción de  $1/20$ . Sin embargo, debido a limitaciones de fabricación, el espesor de los paneles solo se ajustó en un factor de 2 y la separación entre ellos (conocida como longitud de alimentación “G”) se fijó en 1 mm. Se utilizó un plano de tierra de aluminio con un tamaño de  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ . Los paneles de la antena se fabricaron con cobre de 3 mm de grosor.

Dado que los paneles debían colocarse a una altura específica respecto al plano de tierra, se utilizaron soportes y pernos de nylon para mantenerlos a la distancia adecuada (ver Fig. 4.9). La alimentación se realizó mediante un conector hembra SMA conectado directamente a los paneles. Debido a que la escala no es 1:1, no es posible realizar una comparación directa con las figuras 4.7 y 4.8. Por lo tanto, las antenas se volvieron a simular con estos nuevos valores sin realizar ninguna otra optimización.

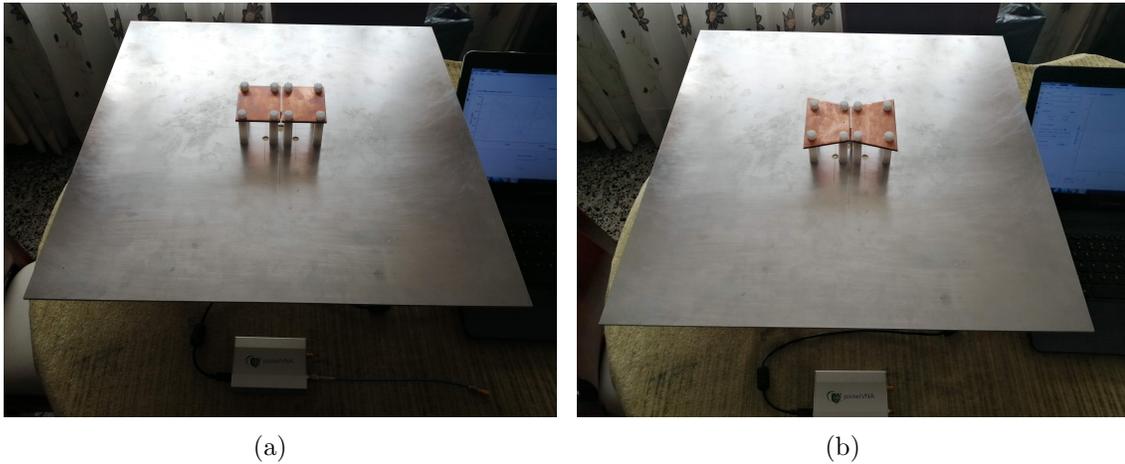


Figura 4.9: Prototipos antenas escaladas. a) antena tipo blade. b) antena tipo corbatín.

#### 4.6.2 Montaje experimental y mediciones

Para medir el patrón de radiación de las antenas, se utilizó una cámara anecoica ubicada en la Universidad Técnica Federico Santa María en Valparaíso, Chile. La cámara anecoica tiene dimensiones de 2.5 metros de alto, 3 metros de ancho y 7 metros de largo y cuenta con un VNA Agilent 8720ES que cubre un rango de frecuencia entre 800 MHz–20 GHz. Esta configuración permitió medir el patrón de radiación para los planos H y E en el rango de 1–2 GHz en pasos de 50 MHz y 1 grado en el ángulo de elevación. Se utilizó un Analizador de Redes Vectoriales (VNA) Keysight E5061B para medir el parámetro  $S_{11}$ . Además, se utilizaron absorbentes para aislar la antena de cualquier fuente de ruido externa y crear un entorno libre de interferencias en este rango de frecuencias.

#### Parámetro $S_{11}$

La Figura 4.10 muestra una buena concordancia entre los resultados de la simulación y la medición del parámetro  $S_{11}$ , especialmente a altas frecuencias. Se encuentra que las antenas optimizadas blade y corbatín muestran un ancho de banda, medido a  $-10$  dB, mayor que la antena original, siendo la antena corbatín aproximadamente 2 y 1,5 veces mayor que la antena blade original y optimizada. Se atribuye las ligeras diferencias entre simulaciones y mediciones a la longitud de alimentación de la antena y la falta de paralelismo entre paneles que hace que Gap no sea uniforme. Al implementar las antenas, no fue posible garantizar que la longitud de alimentación fuera exactamente de 1 mm y que los paneles permanecieran paralelos. Sin embargo, estas desviaciones son lo suficientemente pequeñas como para continuar validando el proceso de diseño.

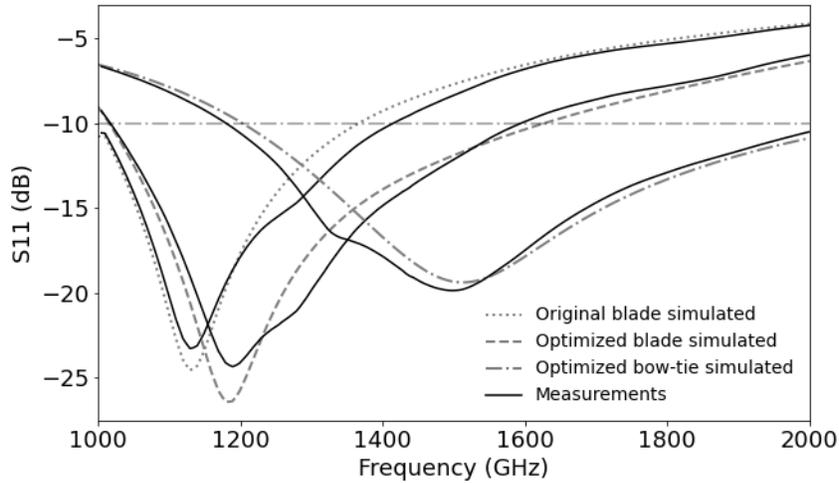


Figura 4.10: Comparación entre mediciones y simulaciones del parámetro  $S_{11}$  para antenas original, optimizada blade y corbatín.

### Mediciones patrón de radiación

Se realizaron mediciones de la ganancia de las antenas para evaluar los niveles de cromaticidad. La Figura 4.11 muestra la comparación entre las simulaciones y las mediciones de la ganancia normalizada, con una concordancia satisfactoria en un rango de aproximadamente 0 a  $-20$  dB.

La forma del haz de la antena proyectada en el cielo es elíptica, con un ancho de haz a mitad de potencia (HPBW) de aproximadamente  $110 \pm 2$  grados en el plano H y  $70 \pm 2$  grados en el plano E en todas las frecuencias estudiadas. En este ancho de haz, se encontraron diferencias promedio menores a 0.4 dB. Además, se observó que la concordancia se mantiene en el rango de azimut de  $-90$  a  $90$  grados. Asimismo, se pudo observar que las antenas tienen su ganancia máxima en ángulos cercanos a 0 grados, confirmando que apuntan hacia el cenit como se esperaba. Sin embargo, para ángulos cenitales mayores a  $90$  grados y menores a  $-90$  grados, se encontraron diferencias más significativas, atribuidas a las limitaciones de la cámara anecoica utilizada para las mediciones y a los efectos del plano de tierra en el patrón de radiación, ya que la antena se encuentra detrás del plano de tierra durante las mediciones.

Finalmente, se presentan gráficos en 3D del patrón de ganancia en diferentes frecuencias, tanto de simulaciones como de mediciones, en las Figuras 4.12 y 4.13. Estos gráficos muestran una distribución equilibrada de la ganancia en todas las frecuencias y un comportamiento suave de la misma, lo que dificulta detectar problemas de cromaticidad. Sin embargo, es importante destacar que, aunque parezca suave en las figuras, la antena aún podría presentar problemas de cromaticidad en los niveles requeridos para este tipo de experimento. Por lo tanto, es fundamental realizar un estudio exhaustivo del comportamiento del haz de la antena.

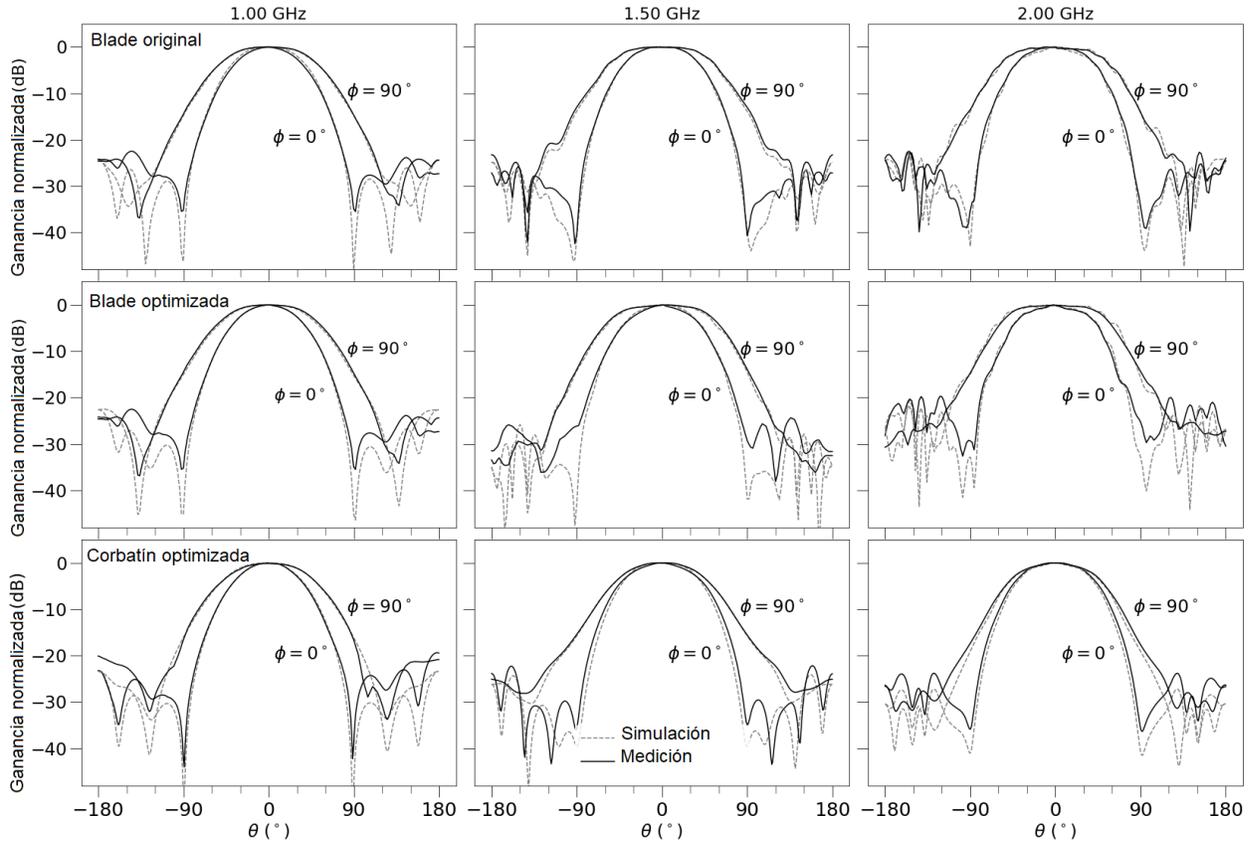


Figura 4.11: Patrones de radiación simulados y medidos de los tres prototipos de antenas escaladas.

### Cromaticidad del haz

Comparaciones entre simulaciones y mediciones respecto a la cromaticidad de ganancia se muestran en las Figuras 4.14 y 4.15. Todas las antenas presentan cambios suaves en su haz cerca del cenit para ambos planos. Las antenas blade, tanto la original como la optimizada, son similares en amplitud y características cromáticas (se observan estructuras a ángulos de elevación superiores a  $20^\circ$ ). Sin embargo, la antena blade original muestra cambios más significativos en magnitud y estructuras adicionales en el cenit y en otras partes en comparación con las otras dos antenas. La antena corbatín muestra un comportamiento mucho más plano y casi sin estructuras hacia el cenit. Además tiene un valor  $RMS_{NBC}$  cercano al 0.70% (por MHz), lo que indica que esta antena tiene un mejor comportamiento cromático que la antena blade [79]. La Tabla 4.4 resume los resultados de la comparación entre simulación y medición del parámetro de cromaticidad del haz para las tres antenas. Estos resultados muestran que el rendimiento de la antena corbatín se mejora en comparación con la antena blade. Esto concuerda con los resultados mostrados en [80] y [81].

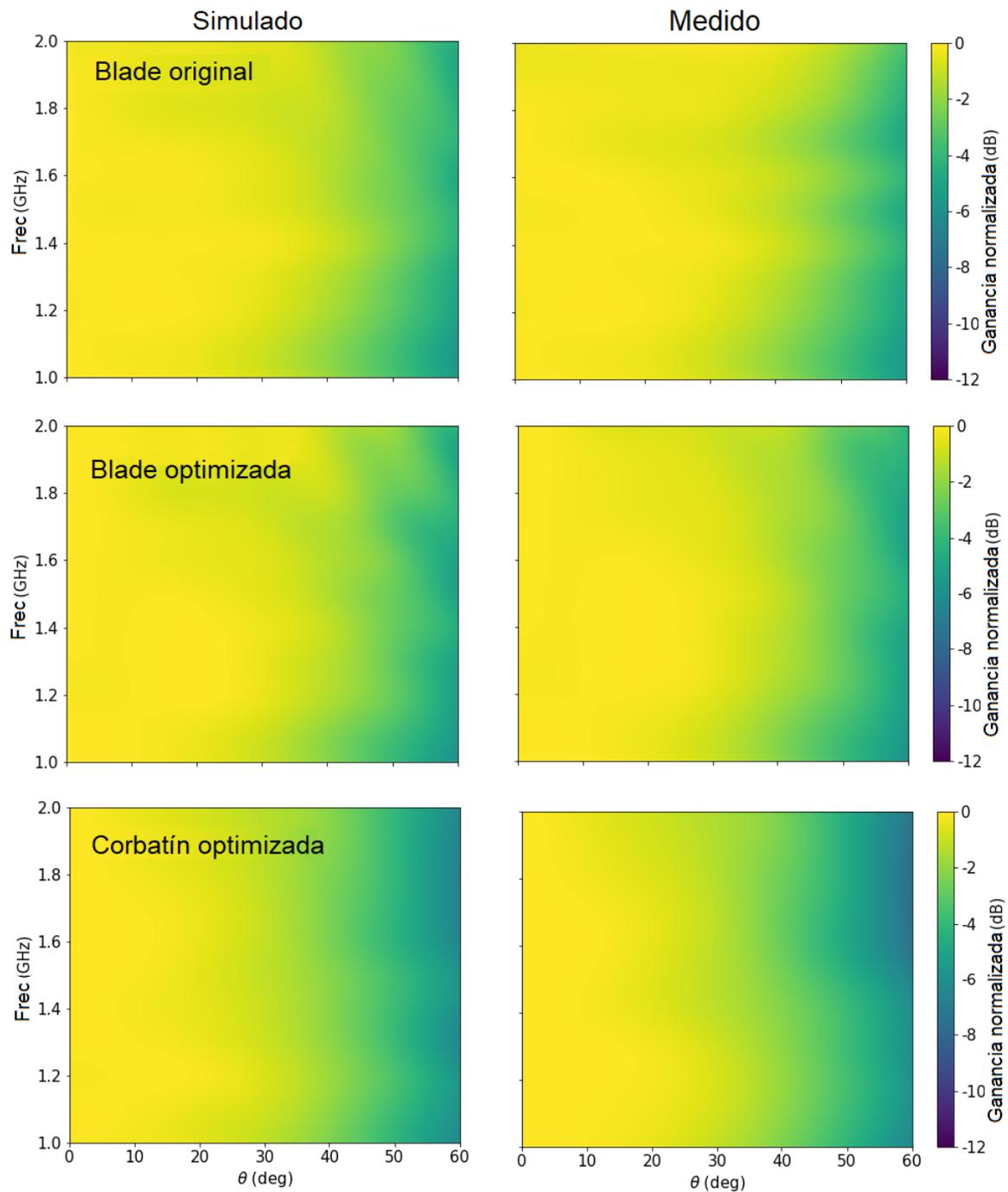


Figura 4.12: Mapas de radiación simulada y medida en función de la frecuencia (eje  $y$ ) y el ángulo cenital  $\theta$  (eje  $x$ ) para las tres antenas a escala. Plano  $\phi = 90$ .

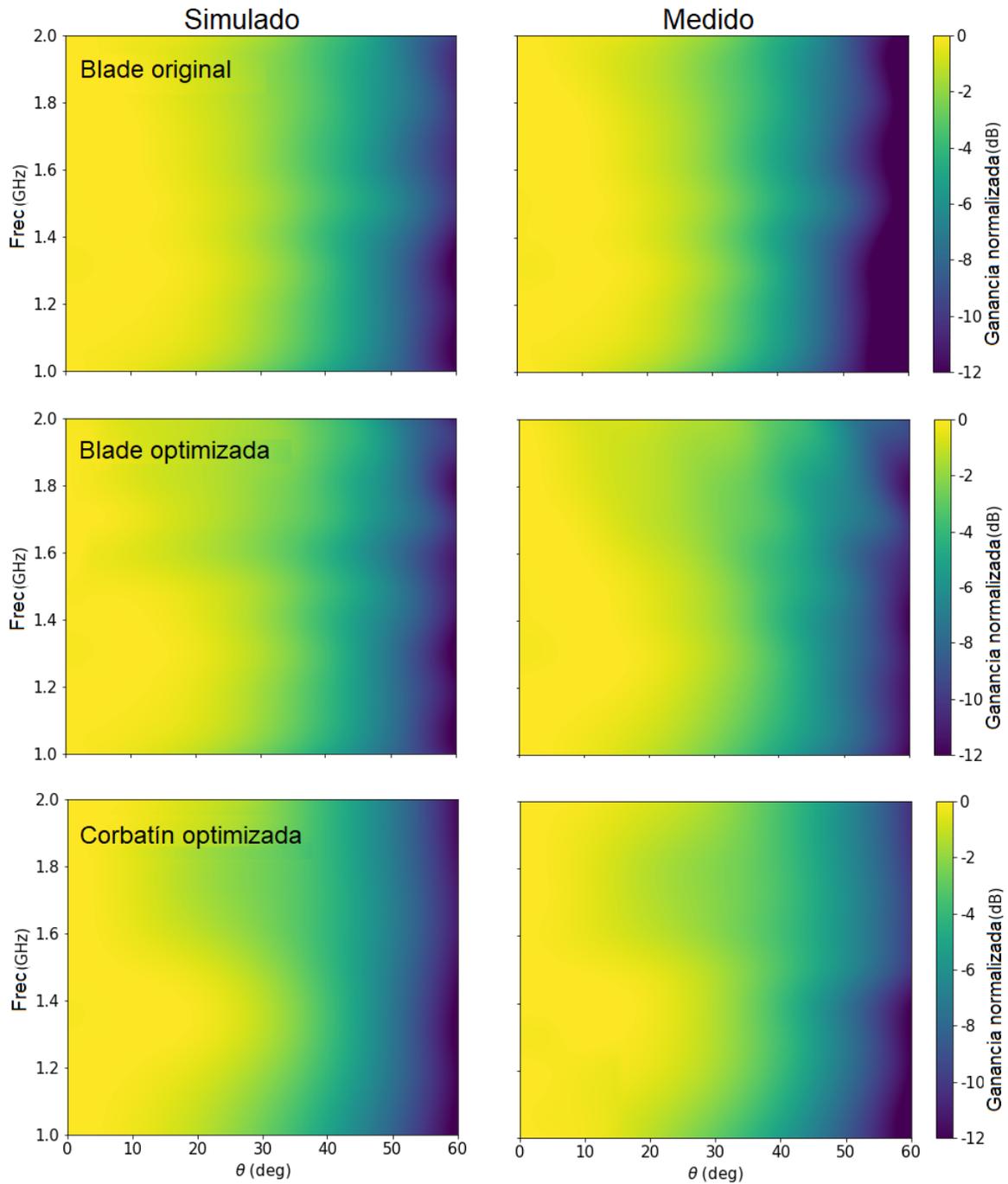


Figura 4.13: Mapas de radiación simulada y medida en función de la frecuencia (eje  $y$ ) y el ángulo cenital  $\theta$  (eje  $x$ ) para las tres antenas a escala. Plano  $\phi = 0$ .

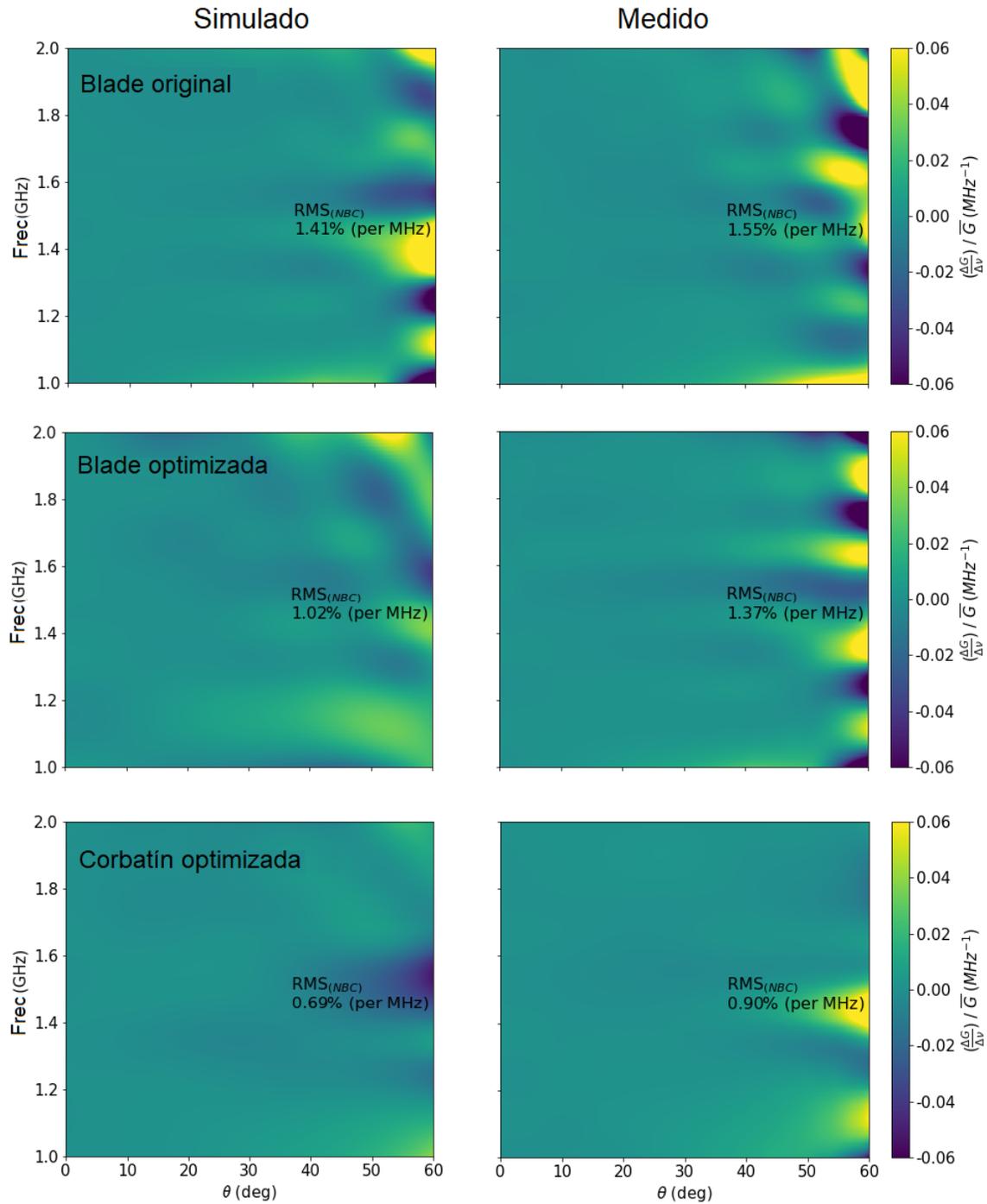


Figura 4.14: Gráfico de color para la derivada de la ganancia simulada y medida en función de la frecuencia (eje  $y$ ) y el ángulo cenital  $\theta$  (eje  $x$ ) para las tres antenas. El  $\text{RMS}_{NBC}$  se calcula para todo el ancho de banda en el plano  $\phi = 90$ .

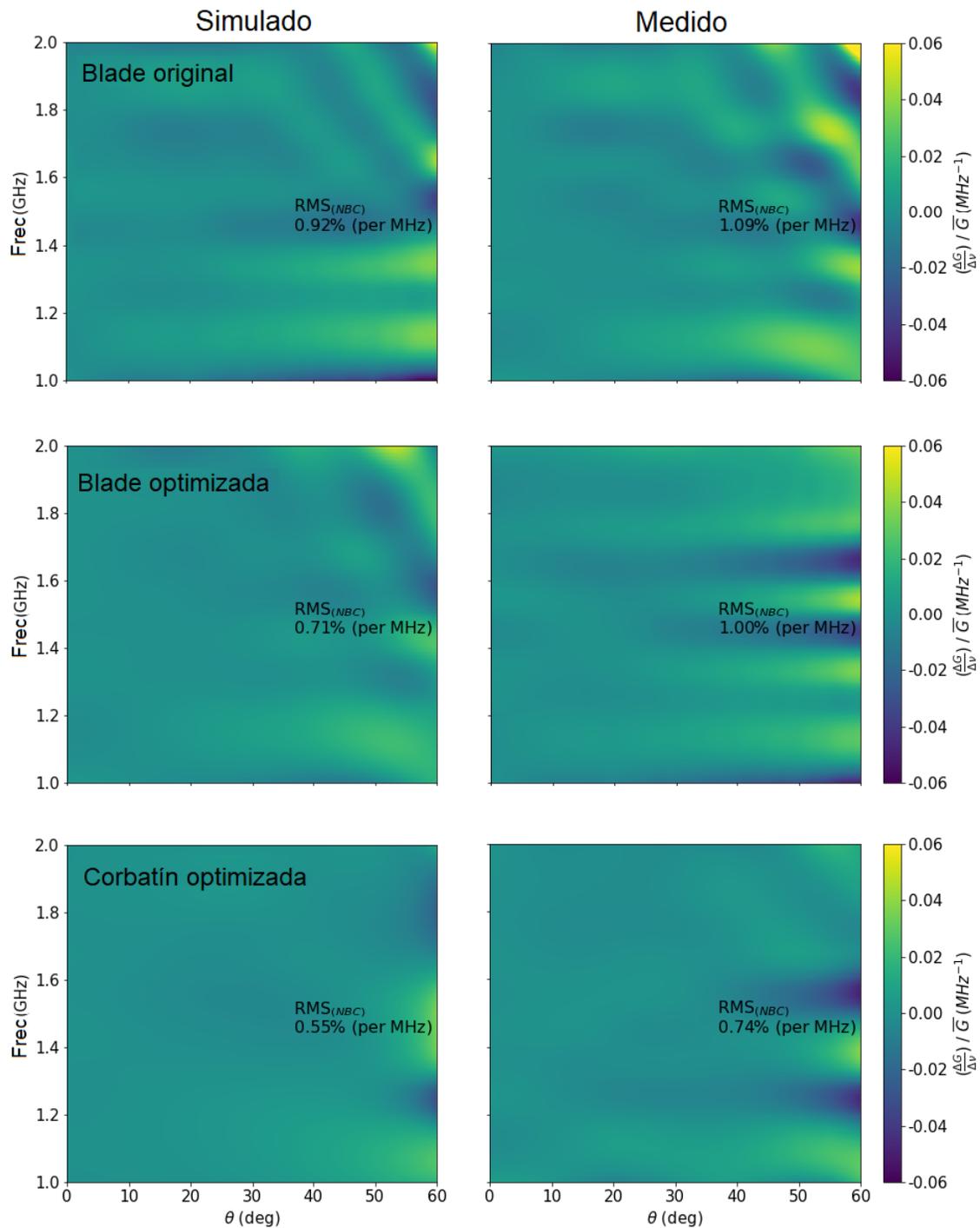


Figura 4.15: Gráfico de color para la derivada de la ganancia simulada y medida en función de la frecuencia (eje  $y$ ) y el ángulo cenital  $\theta$  (eje  $x$ ) para las tres antenas. El  $RMS_{NBC}$  se calcula para todo el ancho de banda en el plano  $\phi = 0$ .

Tabla 4.4: Parámetro de cromaticidad del haz simulado y medido para las tres antenas.

Parámetro de antena	Blade original		Blade optimizada		Corbatín optimizada	
	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$
RMS <sub>NBC</sub> (simulado)	0.92 %	1.41 %	0.71 %	1.02 %	0.55 %	0.69 %
RMS <sub>NBC</sub> (medido)	1.09 %	1.55 %	1.00 %	1.37 %	0.74 %	0.90 %

## 4.7 Comentarios finales

En este capítulo se presentó el método de optimización Particle Swarm Optimization (PSO) aplicado al diseño y mejora del rendimiento de antenas. Se describieron los conceptos fundamentales del PSO, incluyendo la velocidad y actualización de las partículas, así como la selección de los hiperparámetros. Se detalló la implementación del proceso de optimización mediante scripts en Python y HFSS. Se presenta la validación del método y se muestran los resultados obtenidos en el proceso de optimización. Se discutieron los requisitos para el diseño de la antena y el proceso de optimización, como la banda de operación, el parámetro  $S_{11}$ , el ancho de haz a media potencia y la cromaticidad de la antena. Se introdujo la función de mérito utilizada para evaluar la calidad de las soluciones. Además, se realizó un estudio de las antenas seleccionadas, incluyendo su implementación y mediciones experimentales.

Como conclusiones de este estudio se ha demostrado la eficacia del método PSO en la optimización del rendimiento de antenas. Los resultados obtenidos en el proceso de optimización mostraron mejoras significativas en los parámetros de interés, como la banda de operación, el  $S_{11}$ , el ancho de haz a media potencia y la cromaticidad de la antena. La implementación del método mediante scripts en Python y HFSS demostró ser efectiva y de fácil aplicación. La validación del método confirmó su capacidad para encontrar soluciones óptimas. Los resultados experimentales respaldaron los resultados obtenidos en la simulación. En resumen, este estudio proporciona una metodología sólida para el diseño y optimización de antenas utilizando PSO, lo que puede tener aplicaciones significativas en diversas áreas de la ingeniería de comunicaciones.

capitulo 5 todas entran en la compilación

# Capítulo 5

## Modelamiento del cielo y del patrón de radiación para la observación de la línea de 21 cm del Hidrógeno

En este capítulo se presentan modelos de la temperatura media del cielo obtenidos a partir de simulaciones creadas con rutinas en Python. También se explica cómo, mediante un proceso de convolución con el haz de la antena, es posible comprender la variación en la temperatura de la antena a lo largo del día. Esta evaluación del rendimiento de la antena se realiza considerando la latitud y la hora de las observaciones, con el objetivo de analizar cómo afectan los resultados.

### 5.1 Simulación del cielo a bajas frecuencias

Para evaluar el rendimiento de una antena, se puede simular la observación de un modelo de cielo sintético. Para el caso de la línea de 21 cm, se puede utilizar el mapa de Haslam de emisión de fondo en todo el cielo de 408 MHz [85], el cual combina datos de cuatro estudios y está dominado principalmente por la radiación sincrotrón. Este mapa tiene una resolución de aproximadamente 0,85 grados y cuenta con 3.145.728 píxeles, cada uno representando la misma unidad de ángulo sólido en el cielo. Además, ha sido filtrado para remover aquellas fuentes que emiten fuertemente en frecuencias de radio.

A partir de los datos del mapa de Haslam, se puede extrapolar la temperatura de brillo del cielo en todo su espectro electromagnético a bajas frecuencias para crear un modelo de emisión difusa utilizando la ley de potencia,

$$T_{sky} = T_0(\nu/\nu_0)^{-\alpha}, \quad (5.1)$$

donde  $\nu$  se refiere a la frecuencia, mientras que  $T_0$  representa la temperatura del cielo a una frecuencia de  $\nu_0 = 408$  MHz, según el mapa de [85]. Para el índice espectral de la ley de potencia, se toma un valor aproximado de  $\alpha = 2.5$ , el cual corresponde a la emisión galáctica de

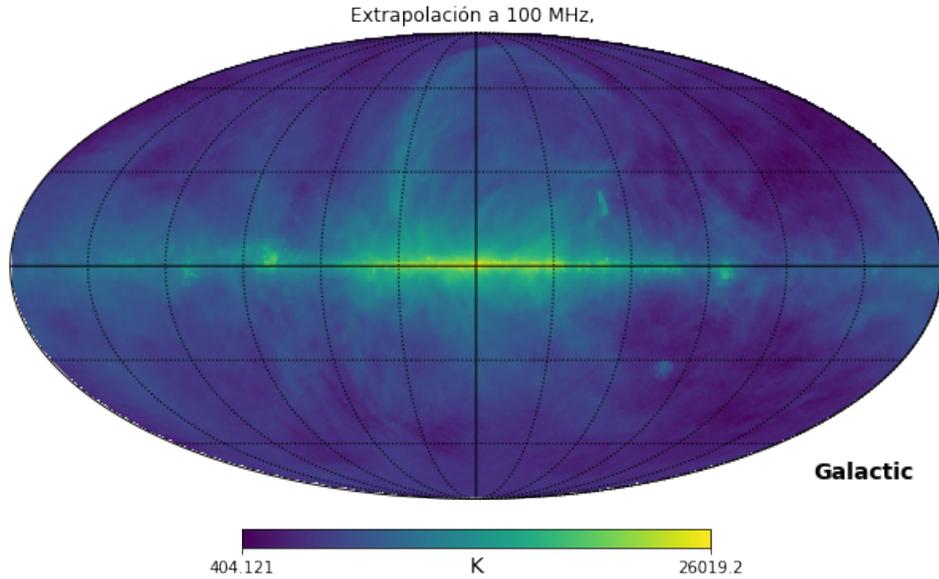


Figura 5.1: Simulación del cielo observado a 100 MHz, extrapolado del mapa de Haslam a 408 MHz, en coordenadas galácticas  $l$  y  $b$ .

sincrotrón de fondo según la investigación realizada en [84].

Para llevar a cabo la extrapolación, se genera una matriz en HEALPix que se basa en las coordenadas galácticas utilizando la biblioteca HEALPy de Python [82] [83] y se aplica la ecuación 5.1. Como resultado, se puede representar la temperatura del cielo en una escala de colores utilizando el esquema de anillos, donde los elementos de la matriz se ordenan en anillos horizontales que comienzan en el polo norte. Como ejemplo de este proceso, en la figura 5.1 se muestra el mapa del cielo en coordenadas galácticas extrapolado a una frecuencia de 100 MHz.

La simulación de observaciones a través de la representación de la temperatura del cielo es una herramienta útil para evaluar el rendimiento de la antena. Este proceso implica generar un modelo de cielo sintético y hacerlo interactuar con el modelo del haz de la antena para calcular su respuesta a diferentes frecuencias y direcciones. Como resultado, se obtiene una matriz de ganancia de la antena que muestra cómo se amplifica o atenúa la señal recibida en diferentes direcciones y frecuencias, permitiendo obtener parámetros de rendimiento como la directividad, la eficiencia, la sensibilidad y el ancho de banda. Además, la simulación permite identificar posibles problemas en el diseño de la antena, como la presencia de lóbulos secundarios o la falta de respuesta en ciertas direcciones, lo que facilita ajustes en el diseño de la antena para mejorar su rendimiento y optimizar su capacidad para detectar señales débiles del cielo.

## 5.2 Simulación del haz de la antena

En esta sección, se lleva a cabo la simulación del haz de tres tipos de antenas: la antena original, que corresponde a un dipolo blade estándar; la antena optimizada, una versión mejorada del dipolo blade; y la antena corbatín, una modificación del dipolo blade que incorpora un ángulo oblicuo que altera su forma.

Para obtener el modelo del haz de la antena, se realizaron simulaciones electromagnéticas utilizando el software HFSS. Estas simulaciones permitieron determinar la respuesta de la antena en el rango de frecuencias entre 40 y 120 MHz. A continuación, se extrajo el haz de la antena con una resolución angular de 1 grado para los ángulos cenital  $\theta$  y azimut  $\phi$ . Se realizó un barrido del rango de frecuencias con esta configuración, utilizando un paso de 1 MHz. La simulación del haz se organizó en una matriz en la que las columnas se distribuyen en un rango ascendente de 0 a 359 grados, y las filas van de 0 a 90 grados. De esta manera, se obtiene el patrón de ganancia correspondiente a una frecuencia fija  $\nu$ , es decir,  $g_\nu = g_\nu(\theta, \phi)$ .

$$g_\nu(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} g_\nu(\theta = 0, \phi = 0) & g_\nu(\theta = 0, \phi = 1) & \cdots & g_\nu(\theta = 0, \phi = 359) \\ g_\nu(\theta = 1, \phi = 0) & g_\nu(\theta = 1, \phi = 1) & \cdots & g_\nu(\theta = 1, \phi = 359) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_\nu(\theta = 90, \phi = 0) & g_\nu(\theta = 90, \phi = 1) & \cdots & g_\nu(\theta = 90, \phi = 359) \end{bmatrix}. \quad (5.2)$$

A continuación, se genera la matriz de ganancia  $G[\nu, \theta, \phi]$  para cada antena. Esta matriz esta compuesta por submatrices que almacenan los valores normalizados de ganancia para cada coordenada horizontal en el cielo  $(\theta, \phi)$  en una frecuencia específica  $\nu$  dentro del rango de frecuencias bajo estudio. La matriz tiene la siguiente estructura,

$$G[\nu, \theta, \phi] = \begin{bmatrix} [g_{\nu_0}(\theta, \phi)] \\ [g_{\nu_1}(\theta, \phi)] \\ \vdots \\ [g_{\nu_n}(\theta, \phi)] \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

siendo  $g_{\nu_m}(\theta, \phi)$  la simulación de haz para la  $m$ -ésima frecuencia dentro del rango determinado. El ancho del haz a  $-3$  dB de las antenas utilizadas en este estudio se pueden ver en la Figura 5.2. En estas figura se puede ver las similitudes en el rendimiento entre las antenas optimizada y corbatín. Sin embargo, es notorio que el ancho del haz de la antena corbatín tiene un comportamiento mas uniforme tendiendo a formar un óvalo proyectado en el cielo. En contraste, la antena original muestra hendiduras que deforman el ancho del haz. Esta es, precisamente, una característica no deseada en este tipo de experimentos estudiados en esta tesis.

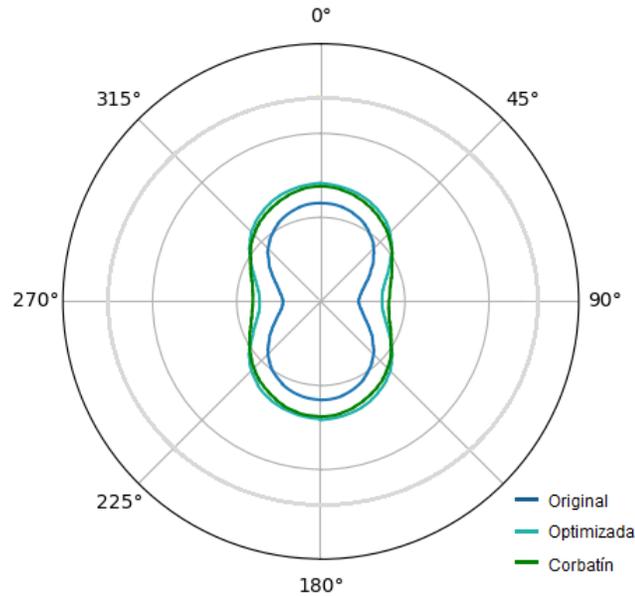


Figura 5.2: Ancho del haz de las antenas a mitad de potencia (HPBW, por sus siglas en ingles) simulado a 100 MHz.

### 5.3 Simulación del espectro dinámico del cielo con patrones de radiación de antenas seleccionadas

Una vez establecido el cielo sintético y la simulación del haz de cada antena, se puede obtener el modelo de espectros dinámicos. Para crear un modelo preciso, se debe tener en cuenta que, en cada momento del día y desde cada lugar de observación, solo se podrá observar la mitad del cielo debido a la limitación del horizonte [89]. Por tanto, en ciertos momentos, se observa un cielo activo en frecuencias de radio debido al paso del centro galáctico por encima del horizonte, mientras que en otros momentos, el cielo esta tranquilo en estas frecuencias. Comprender este movimiento y cómo afecta a las observaciones es fundamental para determinar la forma en que cambia la temperatura de la antena a lo largo del día según el lugar de la observación. Este efecto se puede ver en la Figura 5.3, que muestra el cielo observado en diferentes momentos desde la ubicación cerca del municipio de Uribia, Guajira-Colombia. Para esta simulación, la temperatura del cielo fue extrapolada a 100 MHz a partir del mapa de Haslam utilizando la ecuación 5.1. Luego, las coordenadas galácticas de los píxeles se convirtieron en coordenadas horizontales, mostrándose solo lo que esta por encima del horizonte a las 05:00 y 16:00 UTC. Con este ejemplo, queda clara la importancia del momento en que se realizan las observaciones. Por lo tanto, en lugar de un solo espectro modelado para cada antena, se debe evaluar el rendimiento de la antena obteniendo espectros dinámicos para diferentes momentos del día correspondientes a diferentes orientaciones de antena para varios apuntamientos en coordenadas

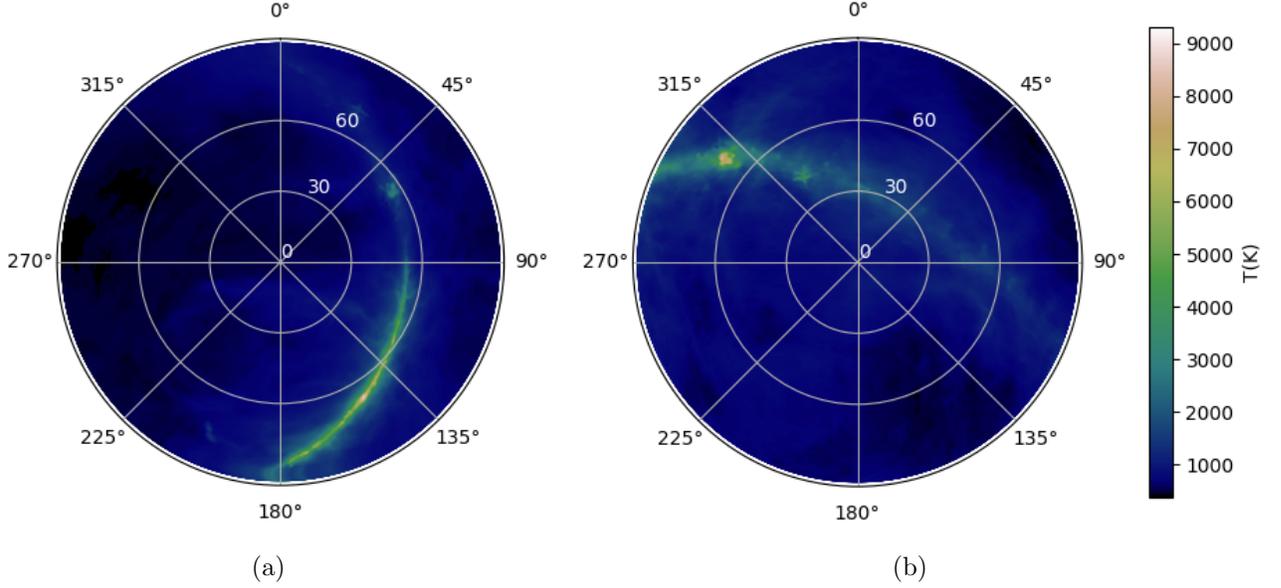


Figura 5.3: Simulación de la temperatura del cielo utilizando el Mapa de Haslam para el día (14 de junio de 2021) en la ubicación del municipio de Uribia (11.9144° N, -71.9991° O) a las 05:00 UTC (a) y 16:00 UTC (b).

galácticas. Un modelo similar fue propuesto en [23].

Para obtener los espectros dinámicos, se toma la ubicación del sitio del municipio de Uribia (11.9144, -71.9991) para las antenas original, optimizada y corbatín. También se elige un día arbitrario (2021-06-14) para la simulación. Se comienza en el tiempo 00:00 UTC. Primero se transforma las coordenadas galácticas de los píxeles de Healpy a coordenadas horizontales utilizando el paquete Astropy 3 de Python [86, 87]. A continuación, se crea una máscara que nos permite considerar solo los píxeles por encima del horizonte, representando lo que la antena puede observar en un momento dado. Se guarda las coordenadas angulares ( $\theta, \phi$ ) de cada píxel junto con la temperatura del cielo correspondiente del mapa de Haslam, lo cual será necesario para la correlación con el patrón de haz de cada antena. Después, para cada frecuencia en el rango elegido para la simulación, se extrapola la temperatura del cielo a partir del Mapa Haslam usando la ecuación 5.1. Luego se hace la convolución de la nueva temperatura del cielo con el patrón de haz de la antena según la matriz  $G[\nu, \theta, \phi]$ . Esencialmente, se está asociando la temperatura de cada píxel con la ganancia respectiva de la antena en ese punto del cielo, simulando la temperatura de brillo de cada píxel del cielo calculando la siguiente integral [88],

$$T_{ant}(\nu) = \frac{\int d\Omega B(\theta, \phi, \nu) T_{sky}(\theta, \phi, \nu)}{\int d\Omega B(\theta, \phi, \nu)}. \quad (5.4)$$

Aquí  $B(\theta, \phi, \nu)$  es el patrón de haz de la antena dependiente de la frecuencia  $\nu$  y el apuntamiento del cielo  $\theta, \phi$ , y  $T_{sky}$  es la temperatura del cielo extrapolada de la ecuación 5.1. Este

proceso, por lo tanto, produce la temperatura del cielo simulada instantánea  $T_{ant}$  corregida por el haz medida por una antena en el tiempo 00:00 UTC. La tarea restante es calcular la media de esas temperaturas para cada frecuencia para obtener la temperatura del cielo radio promedio y guardarlas en una matriz que representa la simulación de espectros dinámicos.

Un aspecto de relevancia a tener en cuenta es la importancia de identificar momentos en los cuales se observa un cielo principalmente sin estructura [90]. Esto se cumple cuando las regiones galácticas de longitud galáctica entre  $-90$  y  $90$  grados no se encuentran sobre el horizonte. Estos momentos dan los mejores resultados al hacer las observaciones. Además, se sabe que debido al apuntado y al haz de la antena, la región del cenit será más importante durante las mediciones que las regiones cerca del horizonte. Por lo tanto, resulta imperativo determinar la longitud galáctica del cenit con el fin de verificar de manera precisa qué región de la galaxia está siendo predominantemente captada por la antena. Esto permite estudiar cuándo es el momento óptimo para realizar las observaciones. Para este propósito, se transforma la coordenada horizontal del cenit a coordenadas galácticas<sup>1</sup> (que incluye una nota al pie.) mediante una rutina Astropy y que da una matriz de coordenadas  $(l, b)$  para momentos específicos del día. Este proceso también será importante al extraer los espectros más silenciosos para las antenas y determinar el rendimiento de cada una de ellas. En la Figura 5.4 se puede ver la longitud galáctica del cenit en el día elegido para las simulaciones (14 de junio de 2021). Es notable lo rápido que cambian las longitudes debido a la forma de la galaxia y los parámetros del movimiento de la Tierra en el espacio. Como se explicó anteriormente, será ideal observar el cielo solo cuando las regiones galácticas de longitud galáctica entre  $-90$  y  $90$  grados no estén cerca del cenit, por lo que se ha sombreado en gris la región válida para las observaciones, con longitudes entre  $90$  y  $270$  grados.

Finalmente, al combinar los modelos del cielo sintético, el patrón de radiación de las antenas y el cálculo de las coordenadas galácticas del cenit, se puede determinar qué datos se capturarían principalmente durante la observación. La Figura 5.5 muestra los resultados para las antenas original, optimizada y corbatín desde la ubicación del municipio de Uribia. En la figura 5.5, se representa lo que se observaría a las 05:00 UTC (izquierda), donde la longitud galáctica del cenit sería  $0$  grados, y a las 16:00 UTC (derecha), donde sería  $180$  grados. La última observación deja en evidencia que este escenario sería ideal, ya que el haz de las antenas no tomaría la región de mayor densidad en frecuencias de radio de la galaxia.

---

<sup>1</sup>Las coordenadas galácticas son un sistema de referencia utilizado para ubicar objetos astronómicos en la Vía Láctea. Se basan en la posición del plano galáctico y el centro galáctico. Por otro lado, las coordenadas horizontales son un sistema de referencia que utiliza el horizonte local del observador como punto de partida para ubicar objetos en el cielo. Estas coordenadas están relacionadas con la altitud y la azimut del objeto desde el punto de observación.

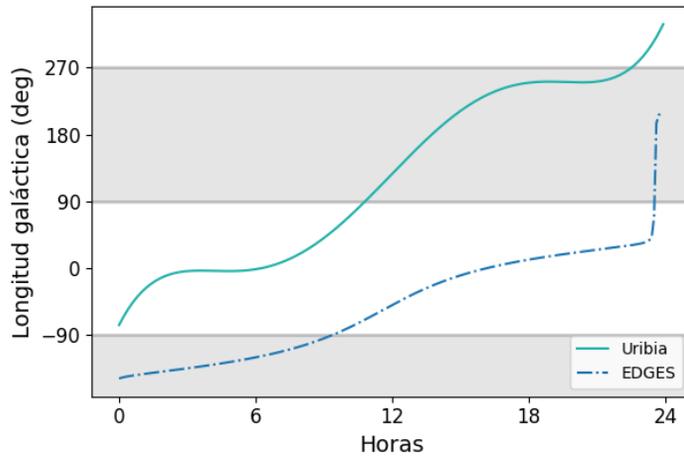


Figura 5.4: Longitud galáctica del cenit para el día (2021-06-14) en las ubicaciones del municipio de Uribia ( $11.9144^\circ$  N,  $-71.9991^\circ$  O) y EDGES ( $26.70^\circ$  S,  $116.67^\circ$  E). Sombramos con gris las longitudes válidas para las observaciones cuando vemos principalmente un cielo sin estructura.

## 5.4 Comparación del desempeño de antenas usando simulaciones del cielo

### 5.4.1 Antena isotrópica

En esta etapa del estudio, se realizó la simulación del espectro dinámico para una antena ideal isotrópica y acromática, que sirvió como referencia para comparar con el resto de las antenas. Esta simulación representa el espectro que se observaría con una antena casi “perfecta”, lo que implica que las antenas similares a esta tendrían el mejor rendimiento. La simulación se llevó a cabo en un rango de frecuencia de 40 a 120 MHz con una resolución de 1 MHz. Se eligió un día específico (2021-06-14) y se dividió en intervalos de 6 minutos para realizar la simulación. La ubicación seleccionada para el modelo de la antena isotrópica fue en el municipio de Uribia. La simulación del espectro tomó aproximadamente 30 minutos en ejecutarse. Posteriormente, se calcularon las longitudes cenitales galácticas para las horas propuestas utilizando el método previamente discutido para analizar las razones detrás de las diferencias de temperatura. Finalmente, se logró el modelado del espectro dinámico de la temperatura del cielo en función del tiempo y la frecuencia, como se muestra en la Figura 5.6 (izquierda). A través de estos resultados, se enfatiza la considerable variación de la temperatura del cielo a lo largo de un solo día, lo que destaca la importancia del estudio para las observaciones. Se observó que las temperaturas más altas, superiores a 13.000 K, se obtuvieron cuando el centro galáctico (con una longitud galáctica de 0 grados) se encontraba en el cenit, indicado por la línea naranja. Esto coincide con la región más dominada por la emisión sincrotrón galáctica. Asimismo, se delimitaron los momentos en los que se observa principalmente áreas sin estructura, marcados con un cuadro gris, cuando las longitudes galácticas del cenit se encuentran entre 90 y 270 grados.

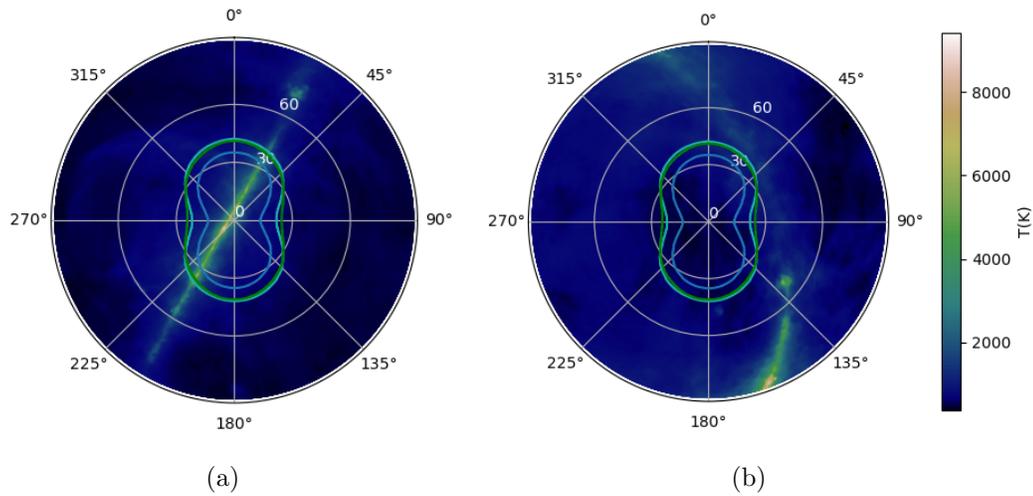


Figura 5.5: Simulación de la temperatura del cielo para las 05:00 UTC con 0 grados de longitud galáctica en el cenit (a) y las 16:00 UTC con 224 grados en el cenit (b). Ambas simulaciones se realizaron para el día (2021-06-14) en la ubicación del municipio de Uribia (11.9144° N, -71.9991° O). Se representan los patrones de radiación de las antenas optimizada (verde marino), corbatín (verde) y original (azul).

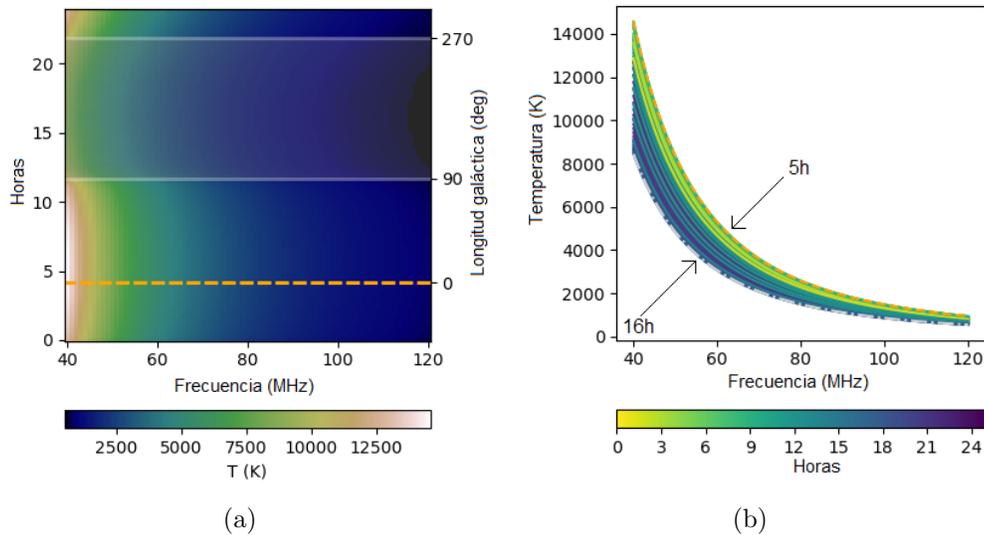


Figura 5.6: a) Espectros dinámicos simulados para la antena isotrópica y acromática. La barra de colores muestra la temperatura de la antena, que varía según la hora del día (2021-06-14) y su relación con la longitud galáctica del cenit. La línea punteada naranja, marca la hora en que el punto de longitud cero está en el cenit y el cuadro gris encierra el período de tiempo en el que sería mejor realizar las observaciones, con longitudes galácticas entre 90 y 270 grados. b) Espectros individuales para momentos distintos del mismo día. La línea punteada naranja marca los espectros para cuando el punto de longitud cero está en el cenit (5:00 UTC). La línea blanca señala el espectro mínimo para ese día (16:00 UTC).

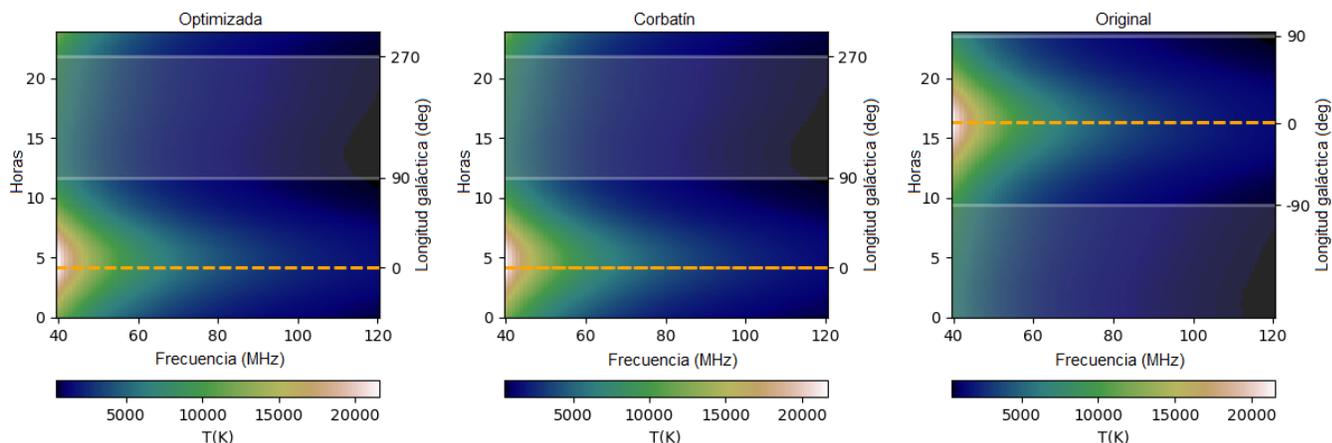


Figura 5.7: Espectros dinámicos simulados para las antenas optimizada, corbatín y original. Las marcas son las mismas que en la Figura 5.6. La antena original se modeló en la ubicación del proyecto EDGES (26.70 S, 116.67 E), mientras que optimizada y corbatín se simularon en la ubicación del municipio de Uribia.

Ahora se pueden extraer cortes de la simulación para obtener espectros en momentos específicos. Estos resultados se presentan en la gráfica derecha de la Figura 5.6. Se observa que la temperatura del cielo varía desde más de 14.000 K para frecuencias bajas hasta menos de 1.000 K para frecuencias más altas. La línea naranja discontinua representa el espectro a las 5:00 UTC, cuando la región más densa en frecuencias de radio se encuentra por encima del horizonte. Por otro lado, la línea blanca discontinua representa el espectro a las 16:00 UTC, momento en el que principalmente se ve la región galáctica tranquila. Estos resultados evidencian las diferencias en las temperaturas en distintos momentos del día.

## 5.4.2 Antenas original, optimizada y corbatín

Se repitió la misma metodología discutida para el modelo isotrópico con las antenas original, optimizada y corbatín. Se utilizaron la misma resolución de frecuencia y tiempo para la simulación. Cada una tarda aproximadamente cuarenta y cinco minutos en completarse. Finalmente, se obtiene cada espectro dinámico que se muestra en la Figura 5.7, con las mismas marcas para las regiones de interés en la longitud galáctica que antes. La antena original se decidió simularla en la ubicación del proyecto EDGES para ver su rendimiento en esas condiciones y comparar con los resultados de las otras antenas. Debido a que estas ubicaciones longitudes opuestas con casi 180 grados de diferencia, el máximo de alta temperatura se desplaza durante aproximadamente 12 horas, aunque ambas fueron simuladas en el mismo día arbitrario.

En la Figura 5.7 no se aprecia ninguna diferencia cromática en el rendimiento de estas antenas, solo con este resultado. Para observar diferencias, se necesitan extraer cortes espectrales para el análisis. Inicialmente, se realizó esto para la simulación de la antena optimizada que

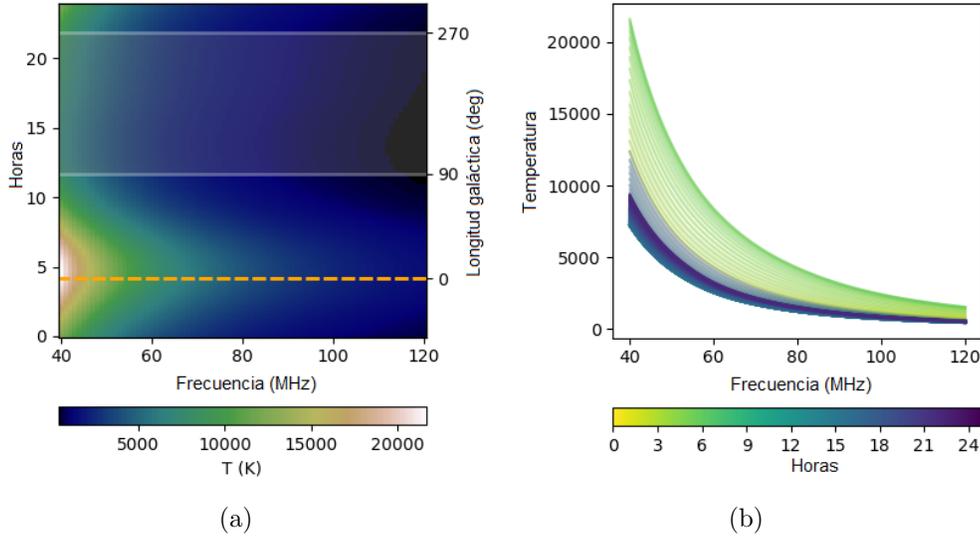
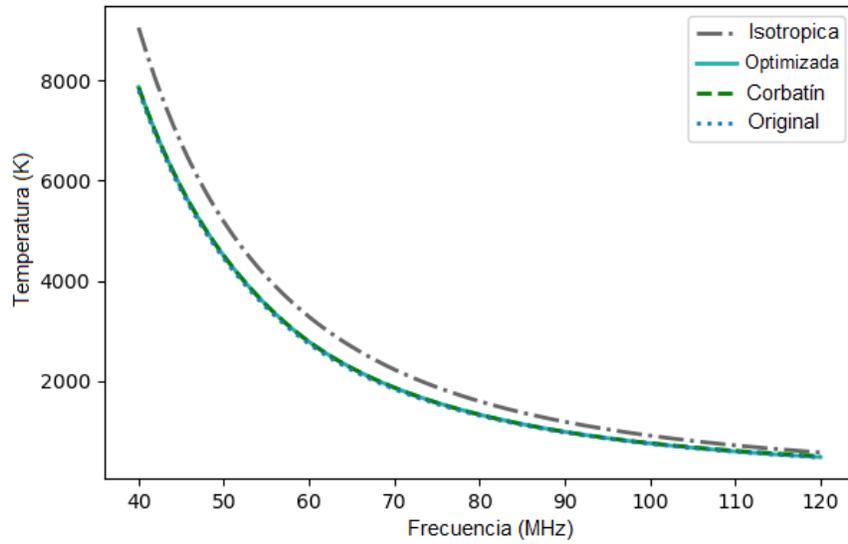


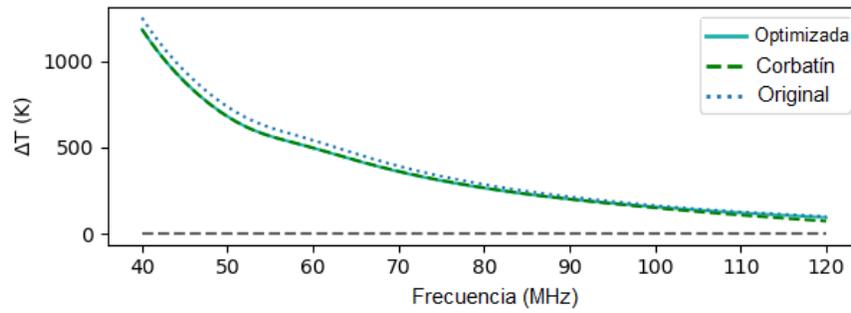
Figura 5.8: a) Espectros dinámicos simulados para la antena optimizada. b) Cortes de espectros para diferentes momentos del día. Los espectros con mayor opacidad son los que se encuentran dentro de los tiempos de interés cuando se tienen longitudes entre 90 y 270 grados en el cenit.

se muestra en la Figura 5.8. A partir de estos resultados, se identificaron los espectros que cumplen la condición de estar en las longitudes galácticas de interés, entre 90 y 270 grados. Los espectros de las otras antenas siguen un comportamiento similar. Posteriormente, para realizar comparaciones entre ellos, considerando que idealmente se tomarían varios espectros en un día de observación, se promediaron los espectros que cumplen la condición antes mencionada. En la Figura 5.9 se muestra el promedio de los espectros deseados con los residuos en términos del espectro ideal isotrópico medio. Se pueden apreciar pequeñas diferencias entre las tres antenas, notando que la antena optimizada y la corbatín tienen un rendimiento similar al ideal isotrópico original. Estos resultados evidencian que, incluso con diferencias discretas, las antenas optimizada y corbatín exhiben los modelos más favorables para la detección de 21 cm, debido a su rendimiento acromático y desviación mínima de la antena ideal isotrópica. Si la señal se encuentra realmente en 78 MHz, la antena corbatín se muestra como el mejor prototipo.

Se procedió a calcular la variación de los residuos en términos de la frecuencia para investigar cuál plana es la respuesta de cada antena y cuánto coincide con el perfil isotrópico. Los resultados se muestran en la Fig. 5.10. Este análisis se hace en las frecuencias comprendidas entre 70 - 120 MHz, donde se espera que se encuentre la señal esperada de 21 cm reportada por [4] a 78 MHz. La curva con la menor pendiente corresponde a la antena corbatín, pero para precisión, se realizó un estudio sobre la desviación estándar de cada derivada mostrada en la Tabla 1. De la Tabla 1, se observa que las diferencias son estrechas dadas para el rendimiento de cada antena. Al comparar las desviaciones estándar para todo el rango de frecuencia, se puede ver que la antena corbatín funciona de manera más similar a la antena isotrópica que las otras. Para el rango de baja frecuencia (40-80 MHz), se observa que ahora la antena optimizada tiene



(a)



(b)

Figura 5.9: a) Espectros promediados para las longitudes galácticas deseadas entre 90 y 270 grados, para las antenas optimizada, corbatín y original. b) Residuos de la temperatura respecto al espectro isotrópico ideal.

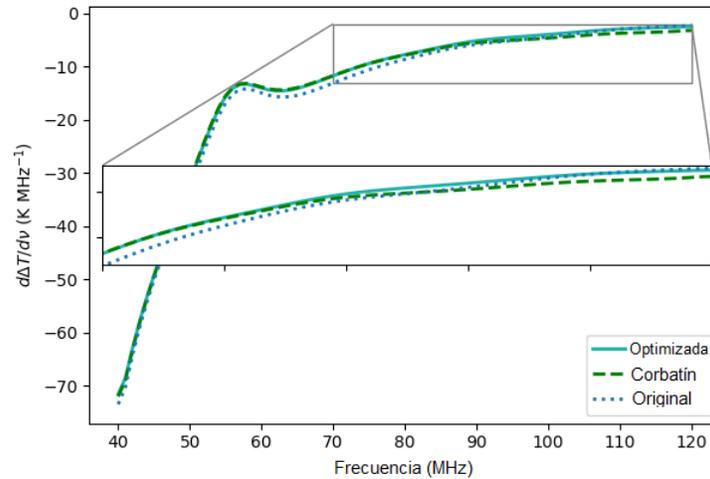


Figura 5.10: Derivada de los residuos de la antena isotrópica, acromática en términos de la frecuencia y de las antenas optimizada, corbatín y original. Para resaltar más estos resultados, se realiza un zoom en las frecuencias entre 70 y 120 MHz, donde se ha reportado la primera detección de la señal de 21 cm.

la mejor desviación estándar, incluso mejor que la antena original. Esto es importante porque en este rango se detecta la señal propuesta por Bowman. Finalmente, para altas frecuencias, se puede ver diferencias más notorias, con la antena corbatín siendo la más prometedora.

Tabla 5.1: Desviación estándar de la derivada de los residuos de temperatura de las antenas optimizada, corbatín y original respecto del modelo ideal isotrópico.

Antena	Desviación estándar (K)		
	Banda de frecuencia (MHz)		
	—40 – 120	40 – 80	80 – 120—
Optimizada	16.11	18.17	1.50
Corbatín	16.00	18.31	1.26
Original	16.41	18.32	1.82

## 5.5 Comentarios finales

Este capítulo tuvo como objetivo hacer simulaciones de cielo promediado que proporcionen soporte para la detección de la señal de 21 cm, especialmente en la época de la Reionización. Se estudió cómo cambia la temperatura del cielo a lo largo del día y las influencias cromáticas de las diferentes antenas propuestas. Además, se estudio en qué momentos del día sería razonable tomar datos. Inicialmente, se creó el modelo del cielo a partir del mapa Haslam, mostrando las temperaturas del cielo durante un día y cómo cambian por hora. Esta simulación mostró los

efectos cromáticos del haz de la antena y es funcional para cualquier hora del día en cualquier latitud, y puede ser acoplada a simulaciones completas del haz de la antena. Se realizó un extenso manejo de datos para obtener espectros dinámicos, lo que demuestra la importancia del tiempo de observación y las consecuencias de la latitud. Del estudio se llegó a que las temperaturas más altas aparecen cuando el centro galáctico está cerca del cenit. Los espectros donde la temperatura es considerablemente más baja, con longitudes galácticas entre 90 y 270 grados, se promediaron para obtener un espectro de referencia para los momentos de cielo radio-quieto. De esta manera, se reduce el ruido del fondo galáctico y se simuló lo que se esperaría de las observaciones.

Además se realizaron estudios de comparación entre las diferentes antenas. Se encontró que los espectros varían muy poco entre sí, por lo que se examinó cuánto difieren de una simulación de una antena isotrópica y acromática. Para el primer análisis, se comparó la antena propuesta optimizada, además de la antena corbatín y original. Los dos primeros tuvieron bajas desviaciones respecto de la isotrópica en todo el rango de frecuencia (40-120 MHz), siendo el modelo de optimizado el mejor para bajas frecuencias (40-80 MHz) y corbatín mejor para altas frecuencias (80-120 MHz). Este resultado es ventajoso ya que si la detección con la antena original es válida, las otras dos antenas serían más adecuadas para detectar la señal.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

### 6.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de esta tesis, se planteó el objetivo general de diseñar herramientas y metodologías para la adecuada observación de la línea de hidrógeno neutro de 21 cm. La investigación ha logrado avances en dos áreas cruciales: el diseño y la optimización de antenas, así como la selección de ubicaciones con baja interferencia electromagnética. Estos avances representan un paso fundamental hacia la detección de la señal global de 21 cm y contribuyen al desarrollo de la radioastronomía de baja frecuencia y la cosmología en general. A continuación, se describen los tres objetivos específicos establecidos para alcanzar este objetivo general

1. *Identificar sitios potenciales con baja interferencia de radiofrecuencia (RFI) en Colombia para el despliegue de un futuro radiotelescopio de baja frecuencia:* Este objetivo se ha logrado mediante la metodología aplicada, la cual ha permitido identificar siete lugares adecuados en Colombia para llevar a cabo observaciones de la señal global de 21 cm. Durante este proceso, se tuvieron en cuenta criterios como la densidad poblacional, la ocupación del espectro radioeléctrico y las condiciones climáticas, lo que ha resultado en la identificación de sitios potenciales con baja interferencia de radiofrecuencia (RFI) para el despliegue de un futuro radiotelescopio de baja frecuencia. Además, se realizó un trabajo adicional centrado en validar la metodología propuesta para la caracterización de las propiedades físicas del suelo. Los resultados obtenidos de las mediciones de resistividad fueron consistentes con las expectativas, validando de esta manera la metodología planteada.
2. *Diseñar, optimizar, validar y caracterizar una antena para el futuro radiotelescopio MIST en la banda de frecuencias de 40 - 120 MHz* ha sido cumplido exitosamente, logrando mejoras significativas en parámetros clave de las antenas. Se ha alcanzado un ancho de banda óptimo de 40 - 120 MHz respecto a un  $S_{11} < -8$  dB para toda la banda y una cromaticidad de la antena por debajo del 1% (por MHz), gracias al uso del método de optimización Particle Swarm Optimization (PSO). La implementación del método mediante scripts en Python y HFSS ha sido efectiva y respaldada por resultados validados experimentalmente.

Además, la aplicación de modelos a escala de las antenas optimizadas ha sido valiosa para corroborar las simulaciones y mejorar la comprensión de su comportamiento. Los resultados obtenidos con los modelos a escala han sido exitosos y permiten validar las simulaciones de las antenas a escala real. Sin embargo, se reconoce que medir con precisión el patrón de radiación de las antenas de forma directa, por su tamaño, es un proceso en constante desarrollo y perfeccionamiento, ya que a tamaños más grandes hay limitaciones en su medición y es posible que se requiera un nivel de precisión aún mayor. Por lo tanto, se debe prestar una atención particular a la precisión para obtener resultados confiables para este tipo de experimentos. Por esta razón, es fundamental explorar otras metodologías y tecnologías que permitan caracterizar de manera más precisa y fiable las antenas diseñadas, lo cual fortalecerá la validez de los resultados obtenidos en simulaciones y experimentos a escala real. En este sentido, la búsqueda de técnicas avanzadas de medición y calibración de antenas, junto con el desarrollo de equipos de alta precisión, será crucial para asegurar la calidad y fiabilidad de los datos obtenidos en futuros estudios. Estos avances en la caracterización de antenas tendrán un impacto significativo en el desarrollo del radiotelescopio MIST y en futuras investigaciones en el campo de la radioastronomía.

3. *Realizar simulaciones de la temperatura media del cielo para la detección de la señal de 21 cm:* El estudio ha logrado desarrollar un modelo del cielo promedio que ha mejorado la comprensión de su comportamiento y se ha demostrado como una herramienta muy útil para comprender los posibles “ruidos” que puedan afectar la detección de la señal de 21 cm. Mediante simulaciones, se ha analizado la variación de la temperatura del cielo a lo largo del día, identificando los momentos más adecuados para tomar datos y las latitudes más favorables para realizar las observaciones. Los resultados obtenidos han demostrado que el fondo galáctico se presenta en bajos niveles en los momentos y latitudes identificados, lo cual es altamente beneficioso para la detección de la señal de 21 cm.

## 6.2 Trabajo Futuro

El trabajo futuro derivado de esta tesis se vislumbra como una continuación prometedora que abrirá nuevas vías de investigación en el campo de la radioastronomía y la cosmología. A continuación, se presentan algunas líneas de trabajo que podrían ser abordadas para expandir los resultados y conocimientos obtenidos:

1. *Optimización avanzada:* Si bien esta tesis demostró la eficacia del método Particle Swarm Optimization (PSO) en la mejora del rendimiento de las antenas, es interesante explorar otras técnicas de optimización avanzada. El uso de algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas mejorado (como PSO híbrido), o técnicas de inteligencia artificial más recientes podría llevar a soluciones aún más óptimas para el diseño de antenas. Estas alternativas podrían ser particularmente beneficiosas en situaciones específicas como el tiempo computacional, convergencia a mínimos globales entre otras.

2. Caracterización detallada de sitios: Ampliar el estudio de sitios potenciales para la observación de la línea de 21 cm en Colombia y otros lugares del mundo. Una caracterización más detallada, que incluya mediciones adicionales y análisis de diferentes condiciones ambientales, uso de metodologías como multi-criterio permitirá tener una visión más completa y precisa de las propiedades físicas de los sitios radiosilentes.
3. Simulaciones más precisas: Continuar mejorando las simulaciones del cielo promedio para obtener resultados más precisos y realistas. Este proceso podría incluir la consideración de factores adicionales que afecten la señal, como la emisión de gases ionizados y la presencia de otras fuentes de emisión en el universo.
4. Implementación de sistemas observacionales: Llevar a cabo la implementación de sistemas observacionales basados en las antenas diseñadas y optimizadas, como en el caso del experimento MIST. El propósito principal de esta implementación es llevar a cabo observaciones reales de la señal global de 21 cm. De esta manera, se podrán validar los resultados obtenidos en las simulaciones y verificar la efectividad de las antenas en condiciones reales.
5. Estudio de la época de Reionización: Enfocarse en un estudio más profundo de la época de la Reionización y cómo la señal de 21 cm puede proporcionar información crucial sobre este período crítico de la historia del universo. Este estudio incluiría investigar cómo la señal se relaciona con la formación y evolución de las primeras estructuras cósmicas.
6. Aplicaciones en otros campos astronómicos: Explorar la aplicación de la metodología de optimización desarrollada en esta tesis en otros campos de la astronomía, la ciencia espacial y las telecomunicaciones. La optimización de antenas puede tener implicaciones significativas en el diseño de otros instrumentos astronómicos y satélites de observación.
7. Colaboraciones internacionales: Fomentar la colaboración con otros grupos de investigación y observatorios astronómicos a nivel internacional. La cooperación con expertos en radioastronomía y cosmología permitiría compartir conocimientos y experiencias, enriqueciendo el estudio de la señal global de 21 cm.

# Bibliografía

- [1] M. Zaldarriaga and S. R. Furlanetto and L. Hernquist, “*21 Centimeter Fluctuations from Cosmic Gas at High Redshifts*”, *The Astrophysical Journal*, 622–635, 2004.
- [2] S. R. Furlanetto, S. Peng Oh., F.H. Briggs, *Cosmology at low frequencies: The 21 cm transition and the high-redshift Universe*, *Physics Reports*, vol. 433, 181 - 301, 2006.
- [3] J. R. Pritchard and A. Loeb, “*21 cm cosmology in the 21st century*”, *Reports on Progress in Physics*, Volume 75, Number 8 2012.
- [4] J. Bowman, et al., “*An absorption profile centered at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum*”, *Nature*, 555, 67, 2018.
- [5] R. Hills, et al., *Concerns about modelling of the EDGES data*. *Nature*, Vol 564, 2018.
- [6] S. Singh, et al., *SARAS 2: a spectral radiometer for probing cosmic dawn and the epoch of reionization through detection of the global 21-cm signal*, *Experimental Astronomy*, Vol 45, 2018.
- [7] T. Jishnu Nambissan, et al., *SARAS 3 CD/EoR radiometer: design and performance of the receiver*, *Experimental Astronomy*, 2021.
- [8] M. Sokolowski, et al., “*BIGHORNS-Broadband instrument for global hydrogen reionization signal*”. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 32. 2015.
- [9] T. C. Voytek, et al., *Probing the dark ages at  $z \approx 20$ : The SCI-hi 21 cm all-sky spectrum experiment*, *Astrophysical Journal Letters*, Vol 782, 2014.
- [10] D. J. Fixsen, E. S. Cheng, J. M. Gales, J. C. Mather, R. A. Shafer, and E. L. Wright, “*The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE FIRAS Data Set*”, *The Astrophysical Journal*, vol. 473, p. 576, doi:10.1086/178173, 1996.
- [11] A. Liu, J. R. Shaw,., *Data analysis for precision 21 cm cosmology*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 132, 2020.
- [12] S. Zaroubi, *The Epoch of Reionization*. In: *Wiklind, T., Mobasher, B., Bromm, V. (eds) The First Galaxies*. *Astrophysics and Space Science Library*, vol 396, 2013.
- [13] R. Barkana, A. Loeb, *Detecting the Earliest Galaxies through Two New Sources of 21 Centimeter Fluctuations*, *The Astrophysical Journal*, vol. 626, 2005.

- [14] B. Zygelman, *Hyperfine Level-changing Collisions of Hydrogen Atoms and Tomography of the Dark Age Universe*, The Astrophysical Journal, vol 622, 2005.
- [15] J. Miralda-Escudé, *The Dark Age of the universe*, Science, 2003.
- [16] R. Umar, et al., *Selection of radio astronomical observation sites and its dependence on human generated RFI*, Research in Astronomy and Astrophysics, Vol 14, 2014.
- [17] M. R. Ingg, et al., *RFI Measurement Database Assembled During the Square Kilometer Array Site Qualification Campaigns*, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2008
- [18] C H. Bye, S K. N. Portillo, and A. Fialkov, *21cmVAE: A Very Accurate Emulator of the 21 cm Global Signal*, The Astrophysical Journal, Vol 930, 2022.
- [19] A. Cohen, et al., *Emulating the global 21-cm signal from Cosmic Dawn and Reionization*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol 495, 2020.
- [20] I. Reis, et al., *The subtlety of Ly  $\alpha$  photons: Changing the expected range of the 21-cm signal*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol 506, 2021.
- [21] M. F. Morales, et al., *Four Fundamental Foreground Power Spectrum Shape For 20 cm Cosmology Observations*, The Astrophysical Journal, Vol 752, 2012.
- [22] D. Anstey, et al., *A general bayesian framework for foreground modelling and chromaticity correction for global 21 cm experiments*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol 506, 2021.
- [23] H. K. Vedantham, et al., *Chromatic effects in the 21 cm global signal from the cosmic dawn*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol 437, 2013.
- [24] R. Monsalve, et al., *Calibration of the edges high-band receiver to observe the global 21 cm signature from the epoch of reionization*, The Astrophysical Journal, Vol 835, 2017.
- [25] A.E.E. Rogers, *Absolute calibration of a wideband antenna and spectrometer for accurate sky noise temperature measurements*, Radio Science, Vol 47, 2012.
- [26] J. Bowman, et al., *A lower limit of  $\delta z > 0.06$  for the duration of the reionization epoch*. Nature. Vol 468. 2010.
- [27] C. M. Beaudet, et al., *RFI Survey at the ALMA Site at Chajnantor*, National Radio Astronomy Observatory, ALMA Memo 470, July. 15, 2003.
- [28] C. J. Lonsdale, et al., *The Murchison Widefield Array: Design Overview*. In Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 8, pp. 1497-1506, doi: 10.1109/JPROC.2009.2017564. 2009.
- [29] G. B. Taylor, et al., *First Light For The First Station Of The Long Wavelength Array*. Journal of Astronomical Instrumentation. Vol 01, 2012.

- [30] J. Pober, et al., “*PAPER-64 constraints on reionization: the 21 cm power spectrum at  $z = 8.4$* ”, *ApJ*, 809, 62, 2015.
- [31] N. Patra, et al., “*SARAS: a precision system for measurement of the cosmic radio background and signatures from the epoch of reionization*”. *Experimental Astronomy*, 2013.
- [32] H. T. Zhang, et al., *A wideband monopole with G type structure*, *Progress in Electromagnetics Research*, vol 76, 2007.
- [33] J. D. Bowman, et al., *Toward Empirical Constraints on the Global Redshifted 21 cm Brightness Temperature During the Epoch of Reionization*. *The Astrophysical Journal*, Vol 676, 2008.
- [34] R. S. Malfajani, et al., *Low-profile Ultra-Wideband Blade Monopole Antenna*, 9th International Symposium on Telecommunication: With Emphasis on Information and Communication Technology, IST 2018.
- [35] B. A. Arand, et al., *Design and fabrication of a broadband blade monopole antenna operating in 30 MHz-600 MHz frequency band*. 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2013.
- [36] M. Nosrati, A. Jafargholi, R. Pazoki and N. Tavassolian, *Broadband Slotted Blade Dipole Antenna for Airborne UAV Applications*, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 3857-3864, doi: 10.1109/TAP.2018.2835524, 2018.
- [37] M. Nosrati, A. Jafargholi and N. Tavassolian, *A broadband blade dipole antenna for UAV applications*, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 1777-1778, doi: 10.1109/APS.2016.7696595, 2016.
- [38] O.A. Restrepo, F.I. Lucero, R. Molina, G. Chaparro, F.P. Mena, R. Bustos., *Design and analysis of a prototype antenna for the low-frequency radio telescope MIST*, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía*, vol. 61C, p.65-65, 2020.
- [39] H. Zhang, L. Chang, J. Zhang and Z. Chen, *Dual band directional bowtie antenna loaded with a square loop*, 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), pp. 35-38, doi: 10.1109/ISAPE.2016.7833666, 2016.
- [40] C. Jarufe, R. Rodriguez, V. Tapia, P. Astudillo, D. Monasterio, R. Molina, F. P. Mena, N. Reyes, & L. Bronfman, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66, 1227, doi:10.1109/TAP.2018.2797534, 2018.
- [41] R. Baldick, et al., *Applied optimization: formulation and algorithms for engineering systems* (Vol. 44). <https://doi.org/10.5860/choice.44-2127>. (2006)
- [42] O.Bozorg-Haddad, Solgi, M., Loáiciga, H. A. *Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization*. <https://doi.org/10.1002/9781119387053> (2017).

- [43] R. Rao Kurada, K.Pavan, A. D. Rao, *A Preliminary Survey on Optimized Multiobjective Metaheuristic Methods for Data Clustering Using Evolutionary Approaches*. International Journal of Computer Science and Information Technology, 5 (5), 57–77. <https://doi.org/10.5121/ijcsit.2013.5504>. 2013
- [44] C. A. C. Coello, Lamont, G. B., Veldhuizen, D. A. V., *Evolutionary Algorithms for Solving Multi- Objective Problems* <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36797-2>. 2007
- [45] M. S. Mora M, *Simulations of the radio-averaged sky for the detection of the 21 cm line in the Epoch of Reionization*, Trabajo de grado, Departamento de física, universidad de Antioquia, Medellín, 2022
- [46] R. Bustos, M. Rubio, A. Otárola, and N. Nagar., *Parque Astronómico de Atacama: An Ideal Site for Millimeter, Submillimeter, and Mid-Infrared Astronomy*, Publ. Astron. Soc. Pacific, vol. 126, no. 946, pp. 1126–1132, 2014, doi: 10.1086/679330.
- [47] P. P. Sitompul, T. Manik, M. Batubara, and B. Suhandi., *Radio frequency interference measurements for a radio astronomy observatory site in indonesia* Aerospace, vol. 8, no. 2, pp. 1–11, 2021, doi: 10.3390/aerospace8020051.
- [48] P. Sitompul, M. Batubara, T. Manik, and B. Suhandi, *Radio Frequency Interference Measurement in VHF and UHF Band at Kupang Area*, J. Phys. Conf. Ser., vol. 1951, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1951/1/012045.
- [49] Ministerio de tecnologías de la información y las telecomunicaciones, Plan técnico nacional de radiodifusión sonora frecuencia modulada FM, Colombia, 2018.
- [50] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Vivienda, Hogares y Personas VIHOPE, [En línea]. Available: <https://n9.cl/v4iw>
- [51] Agencia Nacional del Espectro ANE, Visor de espectro, [En línea]. Available: <https://espectro-co.ane.gov.co/TesMonitorPlanning>
- [52] IDEAM; Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos, [En línea]. Available: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [53] POWER de la NASA; CHIRPS DAILY: Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [54] Google Earth Engine; CHIRPS DAILY: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data <https://earthengine.google.com/>
- [55] Z. Z. Abidin, S. Bahari Ramadhan Syed Adnan, and Z. A. Ibrahim, *RFI profiles of prime candidate sites for the first radio astronomical telescope in Malaysia*, New Astron., vol. 15, no. 3, pp. 307–312, 2010, doi: 10.1016/j.newast.2009.09.003.

- [56] A. A. R. Zohdy and R. J. Bisdorf, *Programs for the automatic processing and interpretation of Schlumberger sounding curves in QuickBASIC 4.0*, Open-File Report 89-137-B, U.S. Geological Survey, 1989.
- [57] S. Ellingson, et al., “*The Long Wavelength Array*”. Proceedings of the IEEE, 97, 8 (2009)
- [58] A. Ewall-Wice, et al., “*Constraining high redshift X-ray sources with next generation*” (2016)
- [59] J. Burns, et al., “*Probing the first stars and black holes in the early Universe with the Dark Ages Radio Explorer (DARE)*”. Advances in Space Research, 49(3), 433-450. (2012)
- [60] N. Aghanim, et al., *XLVI. Reduction of large-scale systematic effects in HFI polarization maps and estimation of the reionization optical depth*. Astronomy and Astrophysics, 2016
- [61] T. J. Mozdzen, et al., “*Limits on foreground subtraction from chromatic beam effects in global redshifted 21 cm measurements*”, MNRAS, 455, 4, 3890 (2016)
- [62] B. Sánchez, et al., “*Sci-HI: Caracterización de la Antena disco-cono para prueba de Sitios*”, Technical report No. 628, INAOE, (2016)
- [63] Planck Collaboration, N. Aghanim, M. Ashdown, et al., “*Planck intermediate results. XLVI. Reduction of large-scale systematic effects in HFI polarization maps and estimation of the reionization optical depth*”. (2016), arXiv:1605.02985
- [64] S. Bharadwaj and S. S. Ali, “*The cosmic microwave background radiation fluctuations from HI perturbations prior to reionization*”. MNRAS.352..142B (2004)
- [65] S. Ellingson, et al., *Now under development, with stations eventually to be distributed over the state of New Mexico, this multipurpose telescope is expected to provide improved angular resolution and sensitivity at frequencies below 88 MHz.*. Vol 97, No. 8, August 2009 Proceedings of the IEEE
- [66] R. Bustos, et al., *First step towards the construction of a Low-Frequency telescope in Chile: RFI site-testing with MARI-UCSC* Quimal/Conicyt Fund 2013 proposal, Project No. 130005
- [67] Blade Dipole Antenna., “<https://linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/an-00501.pdf>”. [Julio 2019]
- [68] W. Junjun, *Antenna Theory and Design* (School of Electronic and Information Engineering Beihang University).
- [69] A. Raghunathan, N. Udayashankar, R. Subrahmanyam, “*An octave bandwidth frequency independent dipole antenna*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 97, No. 8, July 2013
- [70] S. A. Wouthuysen, “*On the excitation mechanism of the 21-cm (radio-frequency) interstellar hydrogen emission line.*”, The Astronomical Journal, 57, page 31, 1952

- [71] G. B. Field, *Excitation of the hydrogen 21-cm line*. Proceedings of the IRE, 46(1):240–250.
- [72] O. Hernandez, “*The Wouthuysen Field Absorption Trough in Cosmic Strings Wakes*”, Physical Review D, Volume 90, Issue 12, 2014
- [73] A. Cohen, et al., “*Charting the Parameter Space of the Global 21-cm Signal*”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 472, Issue 2, p.1915–1931, 2017
- [74] A. N. Tikhonov, V. Y. Arsenin, *Solutions of ill-posed problems*. Washington, D.C.: John Wiley & Sons, New York: V. H. Winston & Sons. 1977
- [75] R. Eberhart and J. Kennedy, *A new optimizer using particle swarm theory*, MHS’95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39–43, doi: 10.1109/MHS.1995.494215.
- [76] F. Vandenbergh, & A. Engelbrecht, *A study of particle swarm optimization particle trajectories*. Information Sciences, 176(8), 937–971. (2006). doi:10.1016/j.ins.2005.02.003
- [77] M. Clerc, & J. Kennedy, *The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6 (1), 58–73. (2002). <https://doi.org/10.1109/4235.985692>
- [78] N. Mahesh, et al., *Validation of the EDGES Low-band Antenna Beam Model*, The Astronomical Journal 162, 38, doi:10.3847/1538-3881/abfdab, URL <https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/abfdab>.
- [79] O. A. Restrepo, et al., *Optimization of Antenna Performance for Global 21 cm Observations and Verification Using Scaled Copies*, Journal of Astronomical Instrumentation, 2023, DOI:10.1142/S2251171723500058,
- [80] J. Cumner, et al., *Radio Antenna Design for Sky-Averaged 21cm Cosmology Experiments: The REACH Case* Journal of Astronomical Instrumentation, (2022) doi:10.1142/S2251171722500015.
- [81] J. Xu, et al., “*Probing cosmic dawn in a global spectrum detection system*”, 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). p. 1. 2021. doi:10.1109/ISAPE54070.2021.9753468.
- [82] K. M. Gorski, et al., *HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere*, The Astrophysical Journal, vol 622, 2005
- [83] A. Zonca, et al., *Healpy: equal area pixelization and spherical harmonics transforms for data on the sphere in Python*, Journal of Open Source Software, vol 4, 2019
- [84] A.E.E. Rogers, and J. D. Bowman,, *Spectral index of the diffuse radio background measured from 100 to 200 MHz*, Astronomical Journal, vol 136, 2008

- [85] C. G. T. Haslam, et al., *A 408 MHz all-sky continuum survey. II - Observations at southern declinations and for the North Polar region*, *Astronomy and Astrophysics*, vol 100, 1982
- [86] Astropy Collaboration et al., *The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package*, *Astronomical Journal*, vol 156, 2018
- [87] Astropy Collaboration et al., *The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package*, *Astronomical Journal*, vol 126, 2013
- [88] T. L. Wilson, K. Rohlfs and S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy*, Springer Science and Business Media, 2013.
- [89] N. Razavi-Ghods, et al., *Analysis of sky contributions to system temperature for low frequency SKA aperture array geometries*, *Experimental Astronomy*. 33. 2011. 10.1007/s10686-011-9278-6.
- [90] K. Ichiki, *CMB foreground: A concise review. Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2014. 6B109-0. 10.1093/ptep/ptu065.
- [91] D. Wang, D. Tan, & L. Liu, *Particle swarm optimization algorithm: an overview*, *Soft Computing*, 22 (2), 387–408. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>
- [92] A. Carlisle, & G. Dozier, *An Off-The-Shelf PSO. Proceedings of the workshop on particle swarm optimization*, (Indianapolis, IN). (2001)