



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA CHOKE RING LOW-COST PARA APLICACIONES DE GNSS”

Trabajo Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORA: ESTHEFANNY VANESSA BONILLA JARA

DIRECTOR: Ing. FABRICIO JAVIER SANTACRUZ SULCA

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Esthefanny Vanessa Bonilla Jara

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Esthefanny Vanessa Bonilla Jara, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 10 de Noviembre del 2023



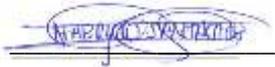
Esthefanny Vanessa Bonilla Jara
060475615-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA CHOKE RING LOW-COSTO PARA APLICACIONES DE GNSS**”, realizado por la señorita: **Esthefanny Vanessa Bonilla Jara**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Jefferson Ribadeneira Ramirez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-11-10
Ing. Fabricio Javier Santacruz Sulca DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-10
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés ASESOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-10

DEDICATORIA

Me gustaría dedicar este trabajo a mi padre Alex, por su amor incondicional y por creer en mí en todo momento. Por sus sacrificios y su apoyo constante ya que han sido la clave de mi éxito. A mi madre, mi heroína, Marcia, ya que, este logro fue gracias a tu amor, sabiduría y dedicación que han guiado cada paso de mi vida porque así aprendí a nunca rendirme. A mi hermana Kiabeth por su cariño y apoyo durante todo este proceso, por estar pendiente, siempre me acompañas en todos mis sueños y metas. Eres mi ejemplo de esfuerzo y valentía. Familia, quiero que sepan que son mi roca y mi ejemplo a seguir, gracias por ser mi luz y por creer en mí. Sin ustedes no lo hubiera logrado. Significan mucho para mí, son la razón de que me levante cada día, me motivan a esforzarme por el presente y el mañana. Finalmente quiero dedicar este trabajo a Sebastián, tu ayuda ha sido fundamental, has estado conmigo en todo momento. Estuviste en cada decisión que tomaba, tuviste paciencia y entrega para conmigo, te agradezco infinitamente, eres el mejor. Este logro también es tuyo porque me has inspirado y ayudado a crecer como persona y profesional.

Esthefanny Vanessa Bonilla Jara

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por haberme permitido vivir hasta este día de la culminación de mi trabajo, protegerme en todo momento y darme fuerzas para superar obstáculos.

Agradezco a las autoridades de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y de la carrera de Telecomunicaciones por brindarme su apoyo y cooperación para culminar mi carrera y para la realización de este trabajo de titulación.

Mi gratitud infinita al Ing. Hugo Moreno Avilés ya que, sin usted, sus virtudes, paciencia, sabiduría y constancia este trabajo no lo hubiese logrado. Gracias por todos sus aportes profesionales.

A la Ing. Mónica Zabala por orientarme en el proceso de realización de este trabajo, sus conocimientos rigurosos y precisos fueron clave para culminación de este trabajo de titulación.

A mi familia por ser el motor que me impulsa a seguir adelante, gracias por estar siempre a mi lado, siempre serán mis mejores guías. Este logro es para ustedes.

A mi amiga Madelaine por brindarme su apoyo, quiero agradecerte por todas las risas y buenos momentos que compartimos durante este proceso, sin tu amistad, este trabajo hubiera sido mucho más difícil.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos Sneider y Cinthya ya que hemos compartido risas y estado juntos durante las tardes y horas de estudio a lo largo de nuestra formación, gracias por su apoyo. También les agradezco a mis amigos del capítulo APS de la Rama Estudiantil IEEE de la ESPOCH por su ayuda en la recolección de datos para finalizar este trabajo de titulación.

Esthefanny

INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ECUACIONES	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación	4
1.3.1 <i>Justificación Teórica</i>	4
1.3.2 <i>Justificación Aplicativa</i>	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	6
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	6

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Parámetros Fundamentales de Antenas.....	7
2.1.1 <i>Diagrama de Radiación</i>	7
2.1.2 <i>Ancho de banda</i>	9
2.1.3 <i>Directividad</i>	9
2.1.4 <i>Ganancia</i>	10
2.1.5 <i>Polarización</i>	11
2.2 Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).....	12
2.2.1 <i>Características de los sistemas GNSS</i>	12
2.2.2 <i>Sistema de Posicionamiento Global GPS</i>	13
2.2.2.1 <i>Composición del sistema GPS</i>	14
2.3 Fuentes de error en la recepción de señales satelitales	17
2.3.1 <i>Efecto multitrayecto</i>	17
2.4 Antena Choke Ring.....	20
2.4.1 <i>Principio de funcionamiento</i>	20

2.5	Antenas Microstrip	22
2.5.1	Características de las antenas microstrip	23
2.6	Materiales y equipos.....	24
2.6.1	FR4	24
2.6.1.1	Características	24
2.6.2	Conector SMA	25
2.6.3	Generador de señales Anritsu MG3692C.....	26
2.6.4	Analizador de espectro radioeléctrico Anritsu MS2724C.....	27
2.6.5	Teléfono celular Xiaomi 11 Lite 5G	28
2.6.6	Teléfono celular Motorola Moto G20.....	29
2.7	Análisis estadístico.....	30
2.7.1	Pruebas de normalidad	30
2.7.1.1	Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov	30
2.7.1.2	Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov con la corrección Lilliefors	31

CAPITULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO.....	33
3.1	Introducción.....	33
3.2	Definición de los parámetros de diseño	34
3.3	Simulación del plano de tierra	36
3.4	Implementación del plano de tierra tipo choke ring	37
3.4.1	Especificaciones de los materiales.....	37
3.4.1.1	Ácido Poliláctico (PLA).....	37
3.4.1.2	Papel Aluminio.....	38
3.4.1.3	Cinta de cobre.....	39
3.4.2	Método de fabricación.....	40
3.5	Antenas para la obtención de datos	42
3.5.1	Antenas patch	42
3.5.2	Antenas monopolo.....	44
3.5.3	Antena U-blox Serie ANN-MB	45
3.5.4	Antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band.....	46
3.6	Geo++ RINEX Logger	47
3.7	Software para el procesamiento de datos GNSS RTKLIB.....	48
3.7.1	RTKLAUNCH	49
3.7.2	RTKPOST.....	49
3.7.3	RTKPLOT.....	53

CAPITULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	54
-----------	---	-----------

4.1	Resultados de la Simulación	54
4.1.1	<i>Campo electromagnético</i>	54
4.1.2	<i>Corriente superficial</i>	56
4.2	Análisis del coeficiente de reflexión	57
4.2.1	<i>Frecuencia L1</i>	57
4.2.1.1	<i>Antena choke ring low-cost con aluminio</i>	59
4.2.1.2	<i>Antena choke ring low-cost con cobre</i>	60
4.2.2	<i>Frecuencia L5</i>	61
4.2.2.1	<i>Antena choke ring low-cost con aluminio</i>	62
4.2.2.2	<i>Antena choke ring low-cost con cobre</i>	63
4.3	Obtención de patrones de radiación	64
4.3.1	<i>Antena Monopolo L1</i>	65
4.3.1.1	<i>Antena choke ring low-cost con aluminio</i>	65
4.3.1.2	<i>Antena choke ring low-cost con cobre</i>	66
4.3.2	<i>Antena Monopolo L5</i>	67
4.3.2.1	<i>Antena choke ring low-cost con aluminio</i>	68
4.3.2.2	<i>Antena choke ring low-cost con cobre</i>	69
4.3.3	<i>Antena U-blox Serie ANN-MB</i>	70
4.3.4	<i>Antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band</i>	71
4.3.4.1	<i>Frecuencia L1</i>	71
4.3.4.2	<i>Frecuencia L5</i>	72
4.4	Mediciones en ambientes con multipath	73
4.4.1	<i>Trayectorias</i>	73
4.4.1.1	<i>Escenario</i>	73
4.4.1.2	<i>Post procesamiento de datos</i>	75
4.4.2	<i>Análisis estadístico</i>	82
4.4.2.1	<i>Pruebas de normalidad</i>	82
4.4.2.2	<i>Análisis estadístico de errores</i>	95
4.4.2.3	<i>Diagrama de cajas y bigotes</i>	99
4.4.3	<i>Medición estática</i>	101
4.4.3.1	<i>Escenario para la toma de datos</i>	101
4.4.3.2	<i>Post procesamiento de datos</i>	101
4.4.4	<i>Discusión de resultados</i>	109
4.4.5	<i>Costo</i>	110
	CONCLUSIONES	111
	RECOMENDACIONES	112
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Características técnicas del generador de señales Anritsu MG3692C.....	26
Tabla 2-2: Características técnicas del analizador de espectro Anritsu MS2724C.....	27
Tabla 2-3: Características técnicas del Xiaomi 11 Lite 5G.....	28
Tabla 2-4: Características técnicas del Motorola Moto G20	29
Tabla 3-1: Parámetros de la configuración del plano de tierra tipo choke ring	36
Tabla 3-2: Características técnicas de la antena U-blox Serie ANN-MB	45
Tabla 3-3: Características técnicas - antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band....	46
Tabla 3-4: Funciones de RTKLIB	49
Tabla 3-5: Datos de la estación fija EREC-EERSA.....	52
Tabla 4-1: Parámetros estadísticos descriptivos de la variable Motorola_altura	83
Tabla 4-2: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable Motorola_altura.....	83
Tabla 4-3: Parámetros estadísticos descriptivos - variable MotorolaAlturaChokeRing Aluminio	85
Tabla 4-4: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio	86
Tabla 4-5: Parámetros estadísticos descriptivos - variable MotorolaAlturaChokeRingCobre ..	87
Tabla 4-6: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable MotorolaAlturaChokeRingCobre.....	88
Tabla 4-7: Parámetros estadísticos descriptivos – variable XiaomiAltura	89
Tabla 4-8: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable XiaomiAltura	90
Tabla 4-9: Parámetros estadísticos descriptivos – variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio	91
Tabla 4-10: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio	92
Tabla 4-11: Parámetros estadísticos descriptivos – variable XiaomiAlturaChokeRingCobre...	93
Tabla 4-12: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable XiaomiAlturaChokeRingCobre.....	94
Tabla 4-13: RMSE calculado en los tres casos con el Motorola Moto G20.	97
Tabla 4-14: RMSE calculado en los tres casos con el Xiaomi 11 Lite 5G.	99
Tabla 4-15: Costo del instrumental para implementación antena choke ring low-cost	110
Tabla 4-16: Costo de acuerdo con el diseño de la antena choke ring low-cost.....	110

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Lóbulos de radiación y ancho de haz.....	8
Ilustración 2-2: Diagramas de radiación en 3D y 2D.....	8
Ilustración 2-3: Tipos de polarización.....	12
Ilustración 2-4: Fases de desarrollo del proyecto NAVSTAR GPS.....	14
Ilustración 2-5: Constelación de satélites expandibles de 24 ranuras.....	15
Ilustración 2-6: Características de las generaciones actuales y futuras de satélites GPS.....	15
Ilustración 2-7: Decaimiento de la amplitud de la señal.....	18
Ilustración 2-8: Corrupción de una señal.....	19
Ilustración 2-9: Cancelación de una señal.....	19
Ilustración 2-10: Aumento de amplitud de la señal.....	20
Ilustración 2-11: Antena choke ring frente al efecto multitrayecto.....	21
Ilustración 2-12: Ondas de campo en una antena Choke Ring.....	21
Ilustración 2-13: Antena microstrip.....	23
Ilustración 2-14: Sustrato FR4.....	24
Ilustración 2-15: Corte transversal de un conector SMA hembra.....	25
Ilustración 2-16: Corte SMA hembra.....	26
Ilustración 2-17: Generador de señales Anritsu MG3692C.....	26
Ilustración 2-18: Analizador de espectros Anritsu MG3692C.....	27
Ilustración 2-19: Xiaomi 11 Lite 5G – Dual GPS.....	29
Ilustración 2-20: Motorola Moto G20 – Single GPS.....	30
Ilustración 3-1: Etapas de implementación y evaluación de la antena Choke Ring low-cost ..	33
Ilustración 3-2: Superficie corrugada en base a resonadores $\lambda/4$	34
Ilustración 3-3: Diseño esquemático plano de tierra tipo choke ring.....	36
Ilustración 3-4: Diseño plano de tierra choke ring. a) Vista 3D b) Vista 2D.....	37
Ilustración 3-5: Filamento PLA.....	38
Ilustración 3-6: Papel Aluminio.....	39
Ilustración 3-7: Cinta adhesiva de cobre.....	40
Ilustración 3-8: Diseño en 3D de Choke ring en el software AutoCAD.....	40
Ilustración 3-9: Asignación del material PLA y visualización del tiempo de impresión.....	41
Ilustración 3-10: Vista de impresión del modelo 3D de la Choke Ring.....	41
Ilustración 3-11: Choke ring en PLA.....	41
Ilustración 3-12: Estructura de la Choke ring recubierta con papel aluminio.....	42
Ilustración 3-13: Estructura de la Choke ring recubierta con cinta adhesiva de cobre.....	42
Ilustración 3-14: Diseño de la antena parche a L1.....	43
Ilustración 3-15: Diseño de la antena parche a L5.....	43
Ilustración 3-16: Antenas parche diseñadas en la banda L de GPS.....	44
Ilustración 3-17: Antenas monopolo diseñadas en la banda L de GPS.....	44

Ilustración 3-18: Antenas monopolo implementadas en la banda L de GPS	45
Ilustración 3-19: Ublox ANN-MB multiband GNSS	46
Ilustración 3-20: Calibrated Survey GNSS Tripleband +L-band	47
Ilustración 3-21: Monitor de Geo++ RINEX Logger.....	47
Ilustración 3-22: Configuraciones de Geo++ RINEX Logger	48
Ilustración 3-23: Pantalla principal de RTKLAUNCH	49
Ilustración 3-24: Archivo de observación	50
Ilustración 3-25: Interfaz del sitio web del IGM - Ecuador	50
Ilustración 3-26: Archivo de navegación	51
Ilustración 3-27: Pantalla principal de RTKPOST	53
Ilustración 3-28: Ventana “Options” en RTKPOST	53
Ilustración 4-1: Campo eléctrico en magnitud	54
Ilustración 4-2: Campo eléctrico en forma vectorial.....	55
Ilustración 4-3: Campo eléctrico en forma vectorial – vista superior	55
Ilustración 4-4: Corriente superficial en magnitud.....	56
Ilustración 4-5: Corriente superficial en magnitud – Anillo 1	56
Ilustración 4-6: Corriente superficial en magnitud – Anillo 2	57
Ilustración 4-7: Ubicación antena monopolo L1 - a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3.....	58
Ilustración 4-8: Parámetro S_{11} simulado a L1 según su ubicación	58
Ilustración 4-9: Monopolo a L1 plano de tierra con aluminio - a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	59
Ilustración 4-10: Parámetro S_{11} -Plano de tierra con aluminio según su ubicación	59
Ilustración 4-11: Monopolo a L1 plano de tierra con cobre - a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	60
Ilustración 4-12: Parámetro S_{11} a L1 - Plano de tierra con cobre según su ubicación	60
Ilustración 4-13: Ubicación del monopolo L5 – a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	61
Ilustración 4-14: Parámetro S_{11} a L5 simulado en las diferentes ubicaciones	62
Ilustración 4-15: Monopolo L5 plano de tierra con aluminio-a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	62
Ilustración 4-16: Parámetro S_{11} a L5 - Plano de tierra con aluminio según la ubicación	63
Ilustración 4-17: Monopolo a L5 - plano de tierra con cobre a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	63
Ilustración 4-18: Parámetro S_{11} a L5 - Plano de tierra con cobre según la ubicación.....	64
Ilustración 4-19: Patrón de radiación Monopolo a L1.....	65
Ilustración 4-20: Escenario – patrón de radiación monopolo L1 a) Aluminio b) Cinta de cobre.....	65
Ilustración 4-21: Monopolo L1 plano de tierra con aluminio – a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	66
Ilustración 4-22: Monopolo L1 plano de tierra con cobre a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3..	67
Ilustración 4-23: Patrón de radiación Monopolo L5	67
Ilustración 4-24: Escenario – patrón de radiación monopolo a L5- a) aluminio b) cobre.....	68

Ilustración 4-25: Monopolo L5 - plano de tierra con aluminio – a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	68
Ilustración 4-26: Monopolo L5-plano de tierra con cobre–a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3	69
Ilustración 4-27: Escenario patrón de radiación – antena U-blox	70
Ilustración 4-28: Patrón de radiación a) Antena U - blox b) Choke ring aluminio c) Choke ring cobre	71
Ilustración 4-29: Escenario patrón de radiación – antena triple banda.....	72
Ilustración 4-30: Patrón de radiación antena de triple banda a L1 con Choke Ring Low-Cost	72
Ilustración 4-31: Patrón de radiación antena de triple banda a L5 con Choke Ring Low-Cost	73
Ilustración 4-32: Trayectoria realizada durante todas las pruebas.	74
Ilustración 4-33: Kit de antena GNSS Polaris.....	74
Ilustración 4-34: Perfil del terreno recorrido.....	75
Ilustración 4-35: Trayectoria – Moto G20	75
Ilustración 4-36: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Moto G20 en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	76
Ilustración 4-37: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	77
Ilustración 4-38: Trayectoria–Moto G20-Choke Ring Low-Cost con aluminio	77
Ilustración 4-39: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Moto G20 y Choke Ring Low-Cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	78
Ilustración 4-40: Trayectoria–Moto G20-Choke Ring Low-Cost con cobre	78
Ilustración 4-41: Trayectoria – Xiaomi 11 Lite 5G.....	79
Ilustración 4-42: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Xiaomi 11 Lite 5G sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	79
Ilustración 4-43: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up....	80
Ilustración 4-44: Trayectoria–Xiaomi 11-Choke Ring Low-Cost con aluminio.....	81
Ilustración 4-45: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	81
Ilustración 4-46: Trayectoria–Xiaomi 11-Choke ring Low-Cost con cobre	82
Ilustración 4-47: Gráfico Q-Q normal de la variable Motorola_altura	84
Ilustración 4-48: Histograma de la variable Motorola_altura	85
Ilustración 4-49: Gráfico Q-Q normal de la variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio.....	86
Ilustración 4-50: Histograma de la variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio.....	87
Ilustración 4-51: Gráfico Q-Q normal de la variable MotorolaAlturaChokeRingCobre	88
Ilustración 4-52: Histograma de la variable MotorolaAlturaChokeRingCobre	89
Ilustración 4-53: Gráfico Q-Q normal de la variable XiaomiAltura	90
Ilustración 4-54: Histograma de la variable XiaomiAltura	91
Ilustración 4-55: Gráfico Q-Q normal de la variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio.....	92
Ilustración 4-56: Histograma de la variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio.....	93
Ilustración 4-57: Gráfico Q-Q normal de la variable XiaomiAlturaChokeRingCobre	94
Ilustración 4-58: Histograma de la variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio.....	95

Ilustración 4-59: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Motorola Moto G20	95
Ilustración 4-60: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Motorola Moto G20 con Choke Ring low-cost de Aluminio	96
Ilustración 4-61: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Motorola Moto G20 con Choke Ring low-cost de Cobre.....	96
Ilustración 4-62: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Xiaomi 11 Lite 5G	97
Ilustración 4-63: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Xiaomi 11 Lite 5G con Choke Ring low-cost de Aluminio.....	98
Ilustración 4-64: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Xiaomi 11 Lite 5G con Choke Ring low-cost de cobre	98
Ilustración 4-65: Diagrama de cajas y bigotes en los tres casos con el smartphone Motorola Moto G20	100
Ilustración 4-66: Diagrama de cajas y bigotes en los tres casos con el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G	100
Ilustración 4-67: Escenario para la toma de datos GNSS en modo estático a) Choke Ring con aluminio b) Choke Ring con Cobre	101
Ilustración 4-68: Datos GNSS obtenidos en prueba estática utilizando el smartphone Moto G20.....	101
Ilustración 4-69: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Moto G20 en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	102
Ilustración 4-70: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	103
Ilustración 4-71: Toma de datos GNSS en la prueba estática utilizando el smartphone MotoG20 y Choke Ring low-cost con aluminio.....	103
Ilustración 4-72: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	104
Ilustración 4-73: Toma de datos GNSS prueba estática utilizando el smartphone Moto G20- Choke ring low-cost con cobre	105
Ilustración 4-74: Toma de datos GNSS prueba estática utilizando el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G	105
Ilustración 4-75: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Xiaomi 11 Lite 5G en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	106
Ilustración 4-76: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up..	107
Ilustración 4-77: Toma de datos GNSS en la prueba estática utilizando el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G – Choke ring low-cost con aluminio.....	107
Ilustración 4-78: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up	108
Ilustración 4-79: Toma de datos GNSS en la prueba estática utilizando el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G – Choke ring low-cost con cobre	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Ancho de banda	9
Ecuación 2-2: Directividad	9
Ecuación 2-3: Directividad máxima	10
Ecuación 2-4: Ganancia	10
Ecuación 2-5: Valor de D.....	31
Ecuación 3-1: Profundidad de la superficie reflectora a la frecuencia 1176 MHz.....	35
Ecuación 3-2: Profundidad de la superficie reflectora a la frecuencia 1575,45 MHz.....	35
Ecuación 3-3: Profundidad de la superficie reflectora	35
Ecuación 3-4: Desigualdad geométrica.....	35
Ecuación 3-5: Número de anillos.....	36
Ecuación 3-6: Dimensión del parche cuadrado a L1.	43
Ecuación 3-7: Dimensión del parche cuadrado a L5.	43
Ecuación 3-8: Longitud del monopolo.....	44
Ecuación 4-1: Fórmula para calcular el RMSE.....	97

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

ANEXO B: OBTENCIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN

ANEXO C: MEDICIÓN DEL PERFIL DEL TERRENO

ANEXO D: DATASHEET DE EQUIPOS

ANEXO E: FICHA DE ESTACIÓN PERMANENTE EREC-EERSA

RESUMEN

En la Facultad de Informática y Electrónica se han realizado implementaciones, diseños y simulaciones con varios tipos de antenas para diversas aplicaciones, pero no se ha registrado algún trabajo utilizando la antena choke ring para aplicaciones GNSS, por lo tanto, el presente trabajo de titulación tuvo como objetivo diseñar e implementar una antena choke ring low-cost para aplicaciones de GNSS. Para ello se estudiaron los parámetros fundamentales de las antenas, las características principales de los sistemas GNSS, específicamente de la constelación GPS, además de estudiar el funcionamiento de una antena choke ring. Se utilizó un software de simulación de antenas para su diseño y observación de funcionamiento al incluir antenas monopolo a las frecuencias de la banda L de GPS. Para su implementación se usaron materiales fáciles de conseguir y económicos. Se implementó un diseño con PLA y papel aluminio y otro diseño con PLA y cinta adhesiva de cobre, también se evaluó el funcionamiento del reflector al extraer el patrón de radiación de diferentes antenas. Además, se usaron dos tipos de Smartphone, uno que trabaje a la frecuencia L1 y otro que opere a doble frecuencia dentro de la banda de GPS (L1 y L5), para realizar las pruebas tanto en trayectoria como en el modo estático. Mediante esta metodología se logró determinar que se pueden obtener patrones de radiación más directivos. Para el caso de las pruebas de trayectoria se comprobó que el diseño de la antena choke ring low-cost con cobre proporciona mejores resultados y que existen menos errores en cuanto a las mediciones de posición respecto a la diseñada con aluminio. En este contexto se concluye que se puede obtener una antena choke ring low-cost utilizando el reflector y smartphones equipados con receptores GNSS ya que se puede alcanzar una precisión de posicionamiento aceptable a pesar de su bajo costo.

Palabras clave: <COMUNICACIONES SATELITÁLES>, <ANTENA RECEPTORA>, <CHOKE RING LOW-COST>, <IMPRESIÓN 3D>, <SISTEMAS GNSS>, <SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)>, <EFECTO MULTITRAYECTO>.

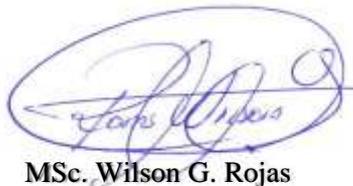


1652-DBRA-UPT-2023

SUMMARY

In the Faculty of Computer Science and Electronics, implementations, designs and simulations have been carried out with various types of antennas for various applications. but no work has been recorded using the Choke Ring antenna for GNSS applications, therefore, the present titling work aimed to design and implement a low-cost choke ring antenna for GNSS applications. For this, the fundamental parameters of the antennas, the main characteristics of the GNSS systems, specifically of the GPS constellation, were studied, in addition to studying the operation of a choke ring antenna. An antenna simulation software was used for its design and observation of operation by including monopole antennas at the frequencies of the GPS L band. For its implementation, readily available and inexpensive materials were used. A design with PLA and aluminum foil and another design with PLA and copper adhesive tape were implemented, the performance of the reflector was also evaluated by extracting the radiation pattern from different antennas. In addition, two types of Smartphones were used, one that works at the L1 frequency and another that operates at double frequency within the GPS band (L1 and L5), to perform the tests both in trajectory and in static mode. Through this methodology it was possible to determine that more directive radiation patterns can be obtained. In the case of trajectory tests, it was verified that the design of the low-cost choke ring antenna with copper provides better results and that there are fewer errors in terms of position measurements compared to the one designed with aluminum. In this context, it is concluded that a low-cost choke ring antenna can be obtained using the reflector and smartphones equipped with GNSS receivers, since acceptable positioning accuracy can be achieved despite its low cost.

Keywords: <SATELLITE COMMUNICATIONS>, <RECEIVING ANTENNA>, <CHOKE RING LOW-COST>, <3D PRINTING>, <GNSS SYSTEMS>, <GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)>, <MULTI-PATH EFFECT>.



MSc. Wilson G. Rojas
NOMBRE Y FIRMA PROFESOR
C.I 0602361842

INTRODUCCIÓN

Dentro de las diferentes aplicaciones en el campo de las Telecomunicaciones se tiene a los Sistemas de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS), los cuales proporcionan información muy precisa y concisa a cerca de la estimación de la velocidad, tiempo y ubicación exacta de un objeto o persona. Además de que sirven de apoyo al transporte o estaciones bases permanentes.

Debido al entorno que tiene que atravesar una señal análoga hasta ser recibida por una antena geodésica, ésta puede transmitirse por múltiples caminos por causa de algunos fenómenos como la reflexión, la difracción y la dispersión. Es por ello por lo que el efecto multitrayecto es uno de los principales inconvenientes que inciden en la calidad de recepción y uno de los problemas que enfrentan las estaciones receptoras a menudo.

Para asegurar la precisión y recepción los Sistemas GNSS, necesitan de una antena geodésica diseñada para recibir ondas electromagnéticas provenientes de los satélites y capaz de minimizar el efecto multitrayecto.

El presente trabajo propone el diseño e implementación de una antena tipo choke ring de bajo costo para aplicaciones de GNSS capaz de mitigar el efecto multitrayecto.

CAPITULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

La antena choke ring se ha posicionado en el mercado como una de las mejores alternativas para mitigar el efecto multitrayecto. En estados Unidos se han llevado a cabo estudios donde se proponen nuevas configuraciones respecto a una antena choke ring normal, en el estado de Oregón se realizaron pruebas con 5 diferentes planos de tierra y dos antenas GPS profesionales, como resultado se planteó un modelo 3D de la antena choke ring el cual permite una mejor recepción de satélites GPS, tiene calidad de seguimiento a baja elevación y por tanto una mejora con respecto al rendimiento multitrayecto (Kunysz y Inc NovAtel, 2003 págs. 1883-1888).

Después de seis años, en el estado de California la empresa Leica Geosystems expone la antena choke ring AR25 3D de banda ancha que dice recibir todas las señales GNSS existentes manteniendo los más altos estándares de rendimiento, se realizaron pruebas en la cámara anecoica para lograr alguna indicación de la capacidad de la antena para mitigar los trayectos múltiples pero también se realizaron pruebas en un entorno real en un período de 24 horas cada diez segundos para comprobar la efectividad del rendimiento de la antena choke ring (Bedford et al., 2009 págs. 829-835).

Mientras que en China en el año 2017 la Facultad de Ciencias e Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Tecnología de Defensa presenta una antena choke ring GNSS geodésica compacta, a diferencia de las antenas tradicionales ésta utiliza una estructura de diente de sierra y un plano de tierra choke ring miniaturizado para lograr un mejor rendimiento de mitigación de trayectos múltiples y un diseño más pequeño (Liu et al., 2017 págs. 2465-2468).

En el país de Canadá también se han realizado algunos estudios acerca de la antena choke ring, en el 2018 el Departamento de Electrónica de la Universidad de Carleton propuso una nueva estructura de conductor magnético artificial AMC sintonizable de banda dual de bajo perfil basada en el plano de tierra de la choke ring de tamaño compacto y fácil de fabricar, la estructura está diseñada para operar simultáneamente en las bandas L2 y L1 con buenas prestaciones de radiación, en el diseño se utilizan dos diferentes materiales dieléctricos como son el FR4 y el Neltec NX9240 ya que al trabajar con diferentes permitividades relativas se logra una respuesta AMC a dos frecuencias diferentes, los resultados arrojaron que la estructura propuesta rechaza con efectividad los trayectos múltiples, pero lo hace mejor en la frecuencia L1, y para la frecuencia L2 son aceptables (Emara et al., 2018 págs. 1-4).

En 2019, la misma Universidad de Carleton propuso el plano de tierra con forma de la choke ring recubierto de cobre e impreso en 3D hecho de plástico de ácido poliáctico (PLA), lo cual permite que el plano de tierra sea liviano y de bajo costo. Las pruebas se realizaron con la antena GNSS Dorne & Margolin (DM), así se demostró experimentalmente que tiene el mismo rendimiento que una choke ring hecha con material metálico. Este método de fabricación abre el camino para diseños más ligeros y económicos para la mitigación de trayectos múltiples (Emara et al., 2019 págs. 721-722).

En Perú en 2021 en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, se realizó el planteamiento del modelamiento y diseño de una antena GNSS de choques frontales lo cual ofrece una variante en el mundo de antenas choques frontales, es decir su diseño se basa en una antena choke normal y tiene en el centro una antena parche común (Coaguila, 2021 pág. 4).

En Latinoamérica, no se han encontrado trabajos de investigación acerca de la construcción de una antena choke ring, únicamente estas antenas se han utilizado para realizar mediciones e instalar redes de estaciones de monitoreo satelital; en el país de Venezuela en el año 2011 se propuso una metodología de generación y actualización cartográfica catastral mediante un sistema que permita la obtención de imágenes áreas de baja altura, trabajaron con un receptor GPS de doble frecuencia con capacidad de captar todos los satélites en vista y que está conectada a una antena tipo choke ring profesional (Camargo, 2011 págs. 2-4). En el mismo país en el año 2007, se propuso instalar una red de estaciones de monitoreo satelital GPS permanente con el fin de brindar información satelital del territorio nacional y para que los usuarios vinculen sus estudios, proyectos e investigaciones al Sistema Geodésico Nacional, esta red contaba con un receptor satelital GPS de doble frecuencia con una antena choke ring (Hernández y Balcázar, 2007 págs. 1-10). Para el año 2020 la Universidad Industrial de Santander en Venezuela propuso instalar siete estaciones permanentes de nueva generación en el territorio venezolano dentro de la red de observación de operación continua GPS del Caribe, para comprender mejor la geodinámica local y regional con implicaciones importantes en el estudio de la amenaza sísmica, la instalación de una estación contaba con un receptor NetR9 y la antena Choke ring de la marca Trimble. (Audemard et al., 2020 págs. 15-30).

En el 2021 en El Salvador también se registró un trabajo donde se propuso la implementación de estaciones de referencia de operación continua CORS para levantamientos geodésicos utilizando un receptor GNSS y una antena geodésica choke ring de manera permanente en la Red Geodésica Nacional, donde los datos recolectados durante las 24 horas y siete días a la semana son enviados al sitio web NGS-NOAA de El Salvador para su posterior uso (Arias et al., 2021 págs. 1-11).

En Ecuador no se han registrado diseños, simulaciones o implementaciones de la antena choke ring. En la Universidad Técnica Particular de Loja se propuso en el 2010 la implantación de una estación permanente GNSS en su campus, la antena de la estación permanente es de tipo choke ring de LEICAT504GG y funciona para los sistemas satelitales GPS y GALILEO (Fárez, 2010 págs. 1-7). En el año 2014 El Instituto Geográfico Militar realizó la actualización del RF Nacional debido al proceso de deformación del marco de referencia, producto de varios agentes, eventos y fenómenos de carácter físico a lo largo del tiempo, para este proceso se utilizaron antenas geodésicas profesionales de Trimble entre ellas la de tipo choke ring TRM59800.00 (Cisneros, 2014 págs. 1-4).

En la ciudad de Riobamba en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo se han realizado implementaciones, diseños y simulaciones con varios tipos de antenas para diversas aplicaciones, pero hasta la actualidad no se ha registrado algún trabajo utilizando la antena choke ring para aplicaciones GNSS. Con estos antecedentes, se puede decir que en la Facultad de Informática y Electrónica no se ha realizado un estudio con la antena choke ring y que la presente propuesta podría beneficiar a los grupos de investigación y a los estudiantes de la facultad para realizar mediciones GPS y futuros trabajos para aplicaciones GNSS.

1.2 Planteamiento del problema

¿Cómo diseñar e implementar una antena choke ring low-cost para aplicaciones de GNSS?

1.3 Justificación

1.3.1 *Justificación Teórica*

La interferencia multitrayecto se produce cuando las señales reflejadas y difractadas llegan a la antena además de las señales de línea de visión directa (LOS) del satélite (Dovis, 2015).

La interferencia entre las señales directas y reflejadas es la principal fuente de degradación del rendimiento en las antenas de referencia de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) (Emara et al., 2019 págs. 721-722). Por ello, el plano de tierra de la antena choke ring es el más utilizado y preferido a la hora de minimizar la interferencia provocada por el efecto multitrayecto debido a su capacidad de supresión de ondas superficiales, sin embargo, presenta desventajas como su costo elevado, es voluminoso y pesado debido a que se construye en metal.

La antena choke ring generalmente es comercializada por grandes empresas lo que la hace costosa, pero su principal componente, el plano de tierra se puede reemplazar con materiales dieléctricos de bajo costo. Una de las alternativas que ha propuesto la Universidad de Carleton ha

sido trabajar con un anillo de choque dieléctrico revestido con un conductor el cual teóricamente tiene el mismo rendimiento que un anillo de choque completamente metálico (Emara et al., 2019 págs. 721-722).

La antena choke ring funcionará dependiendo del rango de frecuencias, generalmente para los sistemas GNSS se utiliza la banda L que va de 1 a 2 GHz. Las frecuencias de las fases portadoras de las bandas L1 (1575.42 MHz) y L5 (1176 MHz), transmitidas por los satélites GPS, quedan dentro de esta banda L.

Para la implementación de la antena choke ring es importante considerar el efecto que provoca en el diagrama de radiación en las antenas para observar su funcionamiento, además de sus parámetros más importantes como la dirección de máxima radiación, directividad y ganancia, el lóbulo principal y lóbulos secundarios. El ancho de banda también es importante para ver el margen de frecuencias en el que va a operar la antena.

1.3.2 *Justificación Aplicativa*

Para el diseño, simulación e implementación de la antena choke ring, se analizará el estado del arte de los parámetros de funcionamiento (diagrama de radiación, ancho de banda, directividad, ganancia) de la antena choke ring low-cost para aplicaciones de GNSS. Se ocupará un software de simulación para realizar el diseño y simulación de una antena parche para cada frecuencia de operación de GPS en la banda L.

Posteriormente se diseñará y simulará una antena choke ring low-cost para la banda de frecuencias L de GPS. Para su implementación, se utilizarán materiales dieléctricos de bajo costo.

Para la etapa de resultados se evaluará el rendimiento de los parámetros de operación de la antena choke ring low-cost. Finalmente se analizará el rendimiento de la antena choke ring low-cost en ambientes severos de multipath y el efecto de la mitigación del ruido sobre la antena GPS del celular.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo General*

Diseñar e implementar una antena choke ring low-cost para aplicaciones GNSS.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- Analizar el estado del arte de los parámetros de funcionamiento (diagrama de radiación, ancho de banda, directividad, ganancia) de la antena choke ring low-cost para aplicaciones de GNSS.
- Diseñar y simular una antena parche para cada frecuencia de operación de GPS en la banda L.
- Simular e implementar una antena choke ring low-cost para la banda de frecuencias L de GPS basada en materiales dieléctricos de bajo costo.
- Evaluar el rendimiento de los parámetros de operación de la antena choke ring low-cost.
- Analizar el rendimiento de la antena choke ring low-cost en ambientes severos de multipath y el efecto de la mitigación del ruido sobre la antena GPS del celular.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Parámetros Fundamentales de Antenas

Una antena es un dispositivo diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia/desde el espacio libre. Una antena transmisora transforma corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. En el caso de que las antenas estén conectadas por medio de guía ondas, esta función de transformación se realiza en el propio emisor o receptor. Se utilizan en la radio, televisión, teléfonos móviles, routers inalámbricos, mandos remotos, etc., unas veces visibles y otras ocultas en el interior del propio dispositivo (Huidobro, 2013 pág. 1).

Existen muchos tipos de antenas que pueden diferenciarse de acuerdo con sus características de ganancia las cuales tendrán mayor o menor potencia o precisión lo cual las relaciona con la directividad para que puedan soportar bandas determinadas de frecuencia.

2.1.1 Diagrama de Radiación

Un diagrama de radiación de una antena o patrón de una antena se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el diagrama de radiación se determina en la región de campo lejano y se representa como una función de las coordenadas direccionales. Las propiedades de radiación incluyen la densidad de flujo de potencia, la intensidad de radiación, intensidad de campo, directividad, fase o polarización (Balanis, 2016 págs. 25-34)

El diagrama de radiación de la antena suele representarse en una escala logarítmica llamada decibelios (dB). Esta escala suele ser la más utilizada por que tiene la capacidad de acentuar con más detalle los lóbulos secundarios de radiación ya que la escala posee valores muy bajos lo que la hace perfecta para este tipo de representación.

Los parámetros importantes del diagrama de radiación son:

- **Lóbulo principal:** Margen angular en torno a la dirección de máxima radiación.
- **Lóbulos secundarios:** Son el resto de los máximos relativos, de valor inferior al principal.
- **Ancho de haz:** Es el margen angular de direcciones, es decir, la dirección en la que la potencia radiada se reduce a la mitad (valor de 3dB).

En la Ilustración 2-1 se pueden observar los lóbulos de radiación y ancho de haz del patrón de radiación típico de una antena en forma polar.

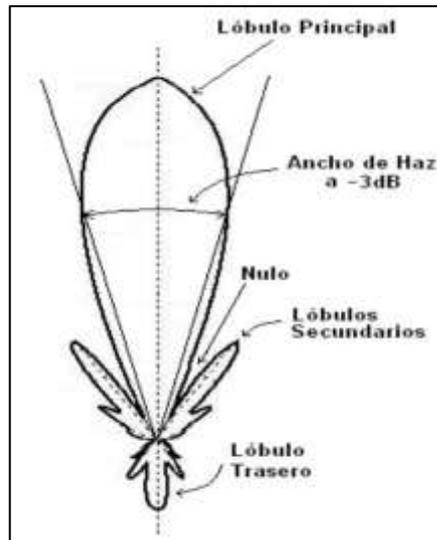


Ilustración 2-1: Lóbulos de radiación y ancho de haz.

Fuente: Luna, 2020, pág. 5

Existen tres tipos de diagramas de radiación:

- **Isotrópicos:** Diagramas en los que se radia la misma densidad de potencia en todas direcciones. Es una esfera.
- **Omnidireccionales:** Diagramas que representan simetría de revolución en torno a un eje. Es decir, es simétrico frente a dos ejes.
- **Directivos:** Diagramas orientados a una región específica. El valor máximo de radiación se concentra en una dirección concreta.

En la Ilustración 2-2 se detallan los diagramas de radiación en 3D y 2D.

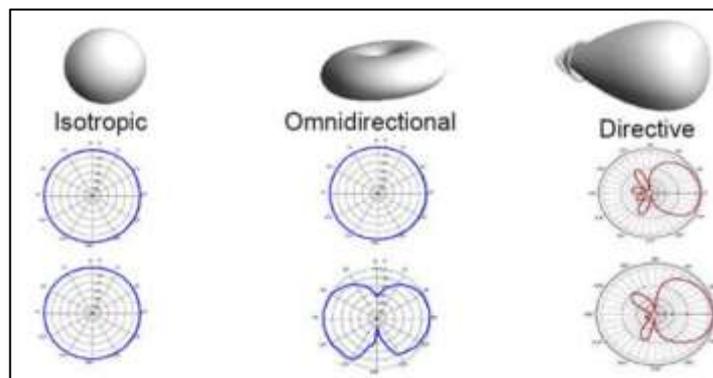


Ilustración 2-2: Diagramas de radiación en 3D y 2D

Fuente: Mohamed El Bouchti, 2016, pág. 16

2.1.2 Ancho de banda

Al rango de frecuencias donde se evalúa el rendimiento de la antena con respecto a alguna característica y se ajusta a una norma especificada se denomina ancho de banda. Los diferentes tipos de antenas que existen tiene diferentes limitaciones con respecto a este parámetro.

Tipos de ancho de banda:

Antenas de banda ancha: El ancho de banda suele expresarse como la relación entre las frecuencias de funcionamiento aceptable. Por ejemplo, un ancho de banda de 10:1 indica que la frecuencia superior es 10 veces mayor que la inferior.

Antenas de banda estrecha: El ancho de banda se expresa como un porcentaje de la diferencia de frecuencia (superior menos inferior) sobre la frecuencia central del ancho de banda. Por ejemplo, un 5% de ancho de banda indica que la gama de frecuencias de funcionamiento aceptable es el 5% de la frecuencia central del ancho de banda (Balanis, 2016 págs. 3-6).

La Ecuación 2-1 del porcentaje de ancho de banda se muestra a continuación.

$$\text{ancho de banda (\%)} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_c} * 100$$

Ecuación 2-1: Ancho de banda

Donde:

f_{\max} : Frecuencia más alta de la banda (Hz)

f_{\min} : Frecuencia más baja de la banda (Hz)

f_c : Frecuencia central de la banda (Hz)

2.1.3 Directividad

La directividad es la relación entre la intensidad de radiación en una dirección determinada de la antena con respecto a la intensidad de radiación promediada en todas direcciones. La intensidad de radiación media es igual a la potencia total radiada por la antena dividida por 4π (Balanis, 2016 págs. 41-54).

La Ecuación 2-2 muestra la directividad en función de la intensidad de radiación y potencia radiada.

$$D = \frac{U}{U_i} = \frac{4\pi U}{P}$$

Ecuación 2-2: Directividad

Donde:

D: Directividad (Adimensional)

U: Intensidad de radiación (W/Unidad de ángulo sólido)

U₀: Intensidad de radiación de la fuente isotrópica (W/Unidad de ángulo sólido)

P_{rad}: Potencia radiada total (W)

Si no se especifica la dirección, implica la dirección de máxima intensidad de radiación (máxima directividad) expresada como la Ecuación 2-3:

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

Ecuación 2-3: Directividad máxima

Donde:

D_{max}, D₀: Directividad máxima (Adimensional)

U_{max} : Intensidad de radiación máxima (W/Unidad de ángulo sólido)

2.1.4 Ganancia

La Ganancia es un parámetro que tiene en cuenta la eficiencia de la antena y sus capacidades direccionales, además de que está estrechamente relacionada con la directividad. La ganancia de una antena (en una dirección determinada) se define como “la relación entre la intensidad, en una dirección determinada, y la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se radiada isotrópicamente” (Balanis, 2016 págs. 61-64).

La Ganancia se encuentra expresada en la Ecuación 2-4.

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}}$$

Ecuación 2-4: Ganancia

Donde:

G: Ganancia (Adimensional)

U(θ, φ): Intensidad de radiación

P_{in}: Potencia total de entrada

Cuando no se especifica la dirección, la ganancia de potencia se suele tomar en la dirección máxima de radiación.

2.1.5 Polarización

La polarización de una onda es la figura geométrica descrita, al transcurrir el tiempo, por el extremo del vector campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación (Cardama et al., 2002 pág. 30).

Existen algunos tipos de polarización:

Polarización lineal: El vector campo eléctrico (o campo magnético) en ese punto está siempre orientado a lo largo de la misma línea recta en cada instante de tiempo. Esto se consigue si el vector campo (eléctrico o magnético) posee:

- a) Una sola componente, o
- b) Dos componentes lineales ortogonales que están en fase temporal o 180° fuera de fase.

Polarización circular: El vector de campo eléctrico (o magnético) en ese punto traza un círculo en función del tiempo. Las condiciones necesarias y suficientes para lograr esto son que el vector de campo (eléctrico o magnético) posea todo lo siguiente:

- a) El campo debe tener dos componentes lineales ortogonales, y
- b) Las dos componentes deben tener la misma magnitud, y
- c) Las dos componentes deben tener una diferencia de tiempo-fase de múltiplos impares de 90° .

Polarización elíptica: Una onda armónica en el tiempo está polarizada elípticamente si la punta del vector de campo (eléctrico o magnético) traza un lugar elíptico en el espacio. En varios instantes de tiempo el vector campo cambia continuamente con el tiempo de tal manera que describe un lugar elíptico. Es de derecha (en el sentido de las agujas del reloj) si el vector de campo gira en el sentido de las agujas del reloj, y está polarizado elípticamente a la izquierda (en sentido contrario a las agujas del reloj) si el vector de campo de la elipse gira en sentido contrario a las agujas del reloj (Balanis, 2016 págs. 70-71) .

Las condiciones necesarias y suficientes para ello son que el vector de campo (eléctrico o magnético) posee todo lo siguiente:

- a) El campo debe tener dos componentes lineales ortogonales, y
- b) Las dos componentes pueden ser e igual o diferente magnitud.
- c) Si las dos componentes no son de la misma magnitud, la diferencia de fase temporal entre las dos componentes no debe ser 0 o múltiplos de 180° (por qué entonces será lineal); Si

las dos componentes son de la misma magnitud, la diferencia de fase temporal entre las dos componentes no debe ser múltiplo impar de 90° (por qué entonces será circular).

En la Ilustración 2-3 se muestran los diferentes tipos de polarización.

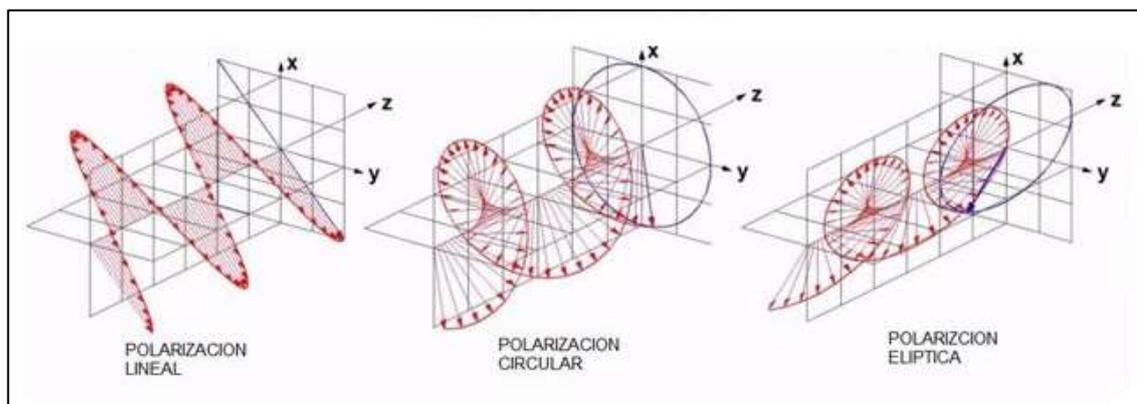


Ilustración 2-3: Tipos de polarización

Fuente: <https://www.midronedecarreras.com/tutoriales/tipos-de-polarizacion-en-antenas-fpv-circular-o-lineal/>

2.2 Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)

Las siglas de GNSS hacen referencia a Global Navigation Satellite System, en español, al Sistema Global de Navegación por Satélite. Dichos sistemas, se basan en una constelación de satélites artificiales que orbitan la tierra a una altitud aproximada de 20 000 km desde la cual transmiten su posición y velocidad del satélite hacia toda la superficie de la tierra.

Este tipo de sistemas están diseñados para poder determinar las coordenadas geográficas de los objetos que se encuentran en la Tierra en cualquier momento, ya sean en el mar, cielo, montañas, etc.

2.2.1 Características de los sistemas GNSS

Existen tres tipos de segmentos que estructuran claramente a un sistema de navegación por satélite, un GNSS no se entiende sin alguno de estos tres elementos, además describen el proceso para caracterizar el funcionamiento de un sistema GNSS.

- **Segmento espacial**

Se compone de satélites que orbitan la Tierra a aproximadamente 17 700 km. Es decir, considerando que las órbitas intermedias se encuentran a una distancia de 10 000 a 20 000 km de la Tierra. Pero en este segmento, los satélites se encuentran en puntos específicos del espacio, por lo que giran en órbita y a una cierta velocidad.

Las principales tareas de los satélites que componen este segmento se pueden resumir en almacenar toda la información que reciben de las distintas estaciones de control en la Tierra y enviar señales a los distintos receptores que controlan los satélites mediante el Sistema de Posicionamiento Global, por ejemplo, vehículos, celulares y hasta aviones o barcos. (López y Guzman, 2014 págs. 9-10).

- **Segmento de control**

Este segmento permite el monitoreo regular de cada satélite, brindándoles información constante sobre su órbita. El segmento de control consta de estaciones automáticas ubicadas en diferentes puntos geográficos y un centro de control para todo el sistema. En general, el sistema funciona de tal manera que las estaciones automáticas reciben la información directamente de los satélites, luego se envía la información recopilada a la estación principal, para posteriormente ser corregida según las necesidades y es enviada de vuelta a cada uno de los satélites que componen la constelación artificial. (López y Guzman, 2014 pág. 10).

- **Segmento de usuario**

Se compone principalmente de los usuarios de la información enviada por los satélites, y permiten realizar la función principal del Sistema de Posicionamiento Global: determinar las coordenadas exactas de un objeto en la Tierra (López y Guzman, 2014 pág. 10).

Este segmento se compone de elementos básicos:

- **Antena receptora:** Antena GNSS a la frecuencia de funcionamiento del sistema, de cobertura hemisférica omnidireccional. Puede ser de muchas formas y materiales, dependiendo de las aplicaciones y del coste del receptor: monopolo, dipolo, dipolo doblado, cónico-espiral, helicoidal o microstrip.
- **Receptor:** De tipo heterodino, basado en la mezcla de frecuencias, permite pasar de frecuencias recibidas en la antena a frecuencias bajas que pueden ser gestionadas por la electrónica del receptor. Contiene un reloj altamente estable (generalmente un oscilador de cristal) y normalmente una pantalla donde mostrar la información de posicionamiento.

2.2.2 Sistema de Posicionamiento Global GPS

El NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing And Ranking Global Positioning System), tiene un origen militar, que comienza, como gran parte de la tecnología que se desarrolla en el siglo

XX, en el año 1973, con la Guerra Fría. La iniciativa, financiación y explotación corrieron a cargo del Departamento de Defensa de Estados Unidos.

La Ilustración 2-4 muestra las fases en orden cronológico para llegar a la creación y estabilización del sistema GPS.

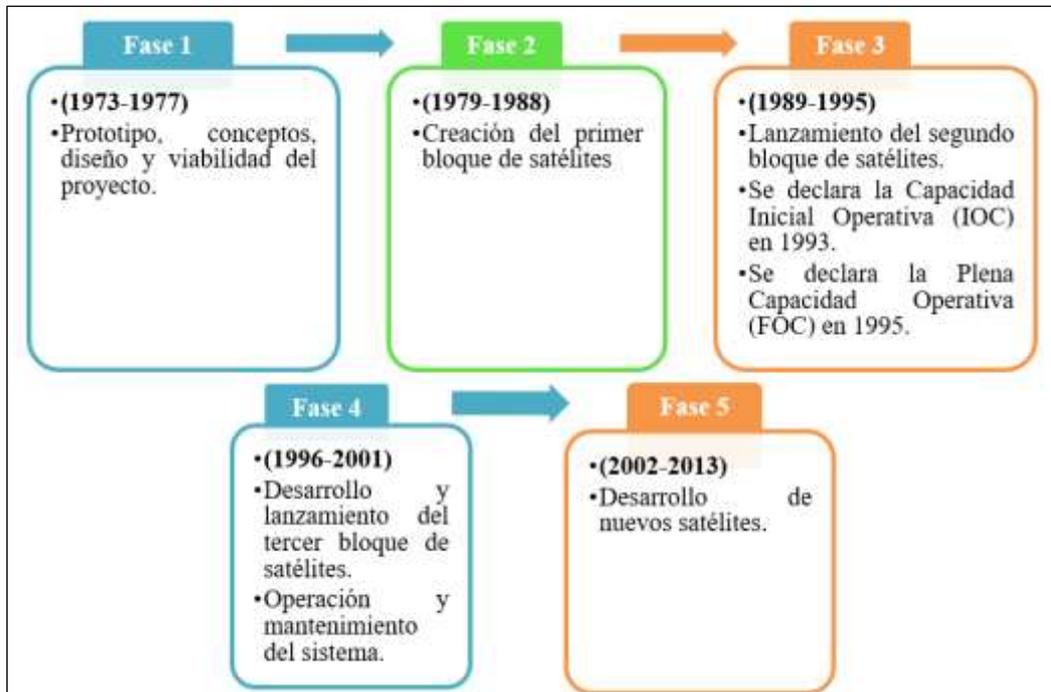


Ilustración 2-4: Fases de desarrollo del proyecto NAVSTAR GPS
Realizado por: Bonilla E., 2023

2.2.2.1 Composición del sistema GPS

GPS por ser el primer sistema, ha definido la arquitectura básica de un GNSS.

Segmento espacial:

Este segmento de GPS consiste en una constelación de satélites que transmiten señales de radio a los usuarios. Estados Unidos se ha comprometido a mantener la disponibilidad de al menos 24 satélites GPS operativos el 95% del tiempo, distribuidos por igual en seis planos orbitales circulares distribuidas uniformemente con una inclinación de 55°. Para garantizar este compromiso, la Fuerza Espacial de EE. UU. ha estado volando 31 satélites GPS operativos durante más de una década. Los satélites GPS vuelan en órbita terrestre media (MEO) a una altitud de aproximadamente 20200 km (12 550 millas). Cada satélite gira alrededor de la Tierra dos veces al día. (U.S. Space Force., 2022)

Tienen como función transmitir señales de ubicación en el mismo instante, debido a que se encuentran sincronizados uno respecto a los demás. El estado y funcionamiento de cada satélite

varía de uno a otro, ya que algunos operan con relojes de Cesio y otros con relojes atómicos de Rubidio. (García, 2008 págs. 7-8)

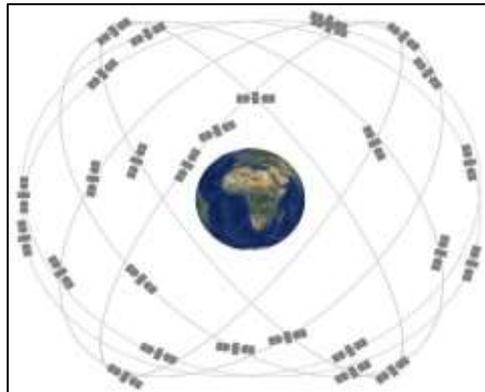


Ilustración 2-5: Constelación de satélites expandibles de 24 ranuras, GPS

Fuente: U.S. Space Force, 2022

La Ilustración 2-5 muestra la mezcla de satélites que posee la constelación GPS ya que son antiguos y nuevos. Además, se muestra las características de las generaciones actuales y futuras de satélites GPS incluyendo los respectivos bloques IIA Segunda generación, “Avanzado”, IIR “Reabastecimiento”, IIR-M “Modernizado”, IIF “Seguimiento”, GPS III y GPS IIIF “Seguimiento”. La Ilustración 2-6 muestra las características más importantes de los satélites de GPS.

SATÉLITES HEREDADOS		SATÉLITES MODERNIZADOS		
BLOQUE IA	BLOQUE IIR	BLOQUE IIR-M	BLOQUE IIR-M	GPS IIIF
0 operativo	7 operativos	7 operativos	12 operativos	5 operativos
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Código de adquisición aproximada (C/A) en la frecuencia L1 para usuarios civiles ▪ Código P(Y) preciso en frecuencias L1 y L2 para usuarios militares ▪ Vida útil del diseño de 7,5 años ▪ Lanzado en 1990-1997 ▪ Último dado de baja en 2019 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Código C/A en L1 ▪ Código P(Y) en L1 y L2 ▪ Monitoreo de reloj a bordo ▪ Vida útil del diseño de 7,5 años ▪ Lanzado en 1997-2004 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todas las señales heredadas ▪ 2ª señal civil en L2 (L2C) SABER MÁS ➔ ▪ Nuevas señales militares de código M para mejorar la resistencia a los atascos ▪ Niveles de potencia flexibles para señales militares ▪ Vida útil del diseño de 7,5 años ▪ Lanzado en 2005-2009 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todas las señales de bloque IIR-M ▪ 3ª señal civil en frecuencia L5 (L5) SABER MÁS ➔ ▪ Relojes atómicos avanzados ▪ Precisión, intensidad de la señal y calidad mejoradas ▪ vida útil del diseño de 12 años ▪ Lanzado en 2010-2016 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todas las señales de bloque IIF ▪ 4ª señal civil en L1 (L1C) SABER MÁS ➔ ▪ Fiabilidad, precisión e integridad de la señal mejoradas ▪ Sin disponibilidad selectiva MÁS INFORMACIÓN ➔ ▪ vida útil del diseño de 15 años ▪ IIIF: reflectores láser; carga útil de búsqueda y rescate ▪ Primer lanzamiento en 2018

Ilustración 2-6: Características de las generaciones actuales y futuras de satélites GPS

Fuente: U.S. Space Force, 2022

Segmento de control:

- **Estación de control maestra (MCS):** Esta estación está ubicada en Colorado en la base Falcon de la US Air Force. Además, hay dos estaciones de reserva en Maryland y California en caso de fallo éstas estarían listas para funcionar inmediatamente.
- **Estaciones de control:** Son estaciones más pequeñas situadas en diferentes partes del mundo algunas de ellas se encuentran en Hawaii, Colorado Springs. También hay lugares donde se encuentran antenas que transmiten información hacia los satélites como son en Ascension Island, Diego García y Kwajalein.

Estas estaciones de control reciben información de los satélites (datos, posición, mensajes, etc), estos datos se envían a la estación de control maestra MCS la cual tiene la función de procesar y aplicar las correcciones necesarias de acuerdo con las órbitas y mensajes de navegación de satélites. Dichas correcciones se transmiten por las estaciones de control que poseen antenas de tierra las cuales también pueden realizar correcciones necesarias de reloj, telemetría o mensajes excepto la órbita de los satélites. Este proceso se realiza tres veces al día.

El servicio SPS de GPS es el que está disponible a nivel global para todos los usuarios de manera gratuita. Su precisión de temporal es de 340 ns con respecto al UTC (Coordinated Universal Time).

Su precisión depende de la captación del número de satélites, si llega a ser entre siete y nueve y éstos están en una geometría adecuada se pueden obtener precisiones inferiores a 2.5 metros en el 95 % del tiempo. Y si al menos se tiene cuatro satélites la precisión es de 10 y 20 metros.

Segmento de usuario:

Conjunto de receptores GPS que utilizan el sistema.

La constelación GPS transmite tres frecuencias diferentes de la banda L. L1, L2 y L5. Los 31 satélites transmiten la señal L1, pero, además, 17 satélites transmiten la señal L2 y 10 satélites transmiten la señal L5.

La frecuencia portadora L1 (1575.42 MHz) se usa para proporcionar el código de Adquisición Aproximada (C/A – Coarse Acquisition) y los códigos de cifrado de precisión P (Y). También se utiliza para transmitir la señal L1C (L1 Civil) y los códigos militares (M) en los satélites del Bloque III.

La frecuencia L2 (1227.60 MHz) se utiliza para transportar el código P (Y), así como la señal L2C y códigos militares en los satélites del Bloque IIR-M y satélites posteriores.

La frecuencia L5 (1176.45 MHz) se está proponiendo esta señal GPS para uso civil como una señal de salvaguardia de vida (SoL). (Duarte, 2016 págs. 4-5)

2.3 Fuentes de error en la recepción de señales satelitales

Puede haber múltiples fuentes de error cuando se trata de la transmisión y recepción de datos e información entre el satélite hasta que llegue a la Tierra.

Los errores que se presentan en la propagación de la señal entre el satélite y el receptor se deben a la afectación de su velocidad de transmisión; considerando un medio ideal y que la señal se propague por el vacío, su velocidad de propagación es la velocidad de la luz; pero en el caso de observaciones GPS estas señales deben atravesar las diversas capas de la tierra para poder alcanzar su objetivo de llegar al receptor que se encuentra ubicado en algún punto de la superficie terrestre.

Al pasar por estas capas la señal sufre un cambio de velocidad y dirección a lo que se considera señales refractadas, afectando directamente a la trayectoria inicial por lo que aumentara su longitud debido a las varias curvaturas sufridas por la señal, por el efecto de la refracción (Hernández et al., 2001 págs. 3-6).

Otras fuentes de error pueden ser:

- Efectos atmosféricos
- Errores de efemérides y reloj
- Refracción Ionosférica
- Refracción Troposférica
- Efecto Multitrayecto
- Ruido en el receptor

En este documento se analiza un poco más a fondo la fuente de error por efecto multitrayecto ya que es la que se considera para realizar el diseño y la implementación de la antena choke ring low-cost.

2.3.1 Efecto multitrayecto

El efecto multitrayecto sucede cuando la señal transmitida toma diferentes caminos debido a las reflexiones o ecos producidas por las características fijas del terreno, como colinas, árboles, edificios u objetos en movimiento, como vehículos, aviones o incluso las personas. De esta forma, se reciben varias versiones retardadas de la misma señal (Ramírez, 2015 pág. 221).

De modo que, por los múltiples caminos de propagación que ocurren entre el transmisor y el receptor se produce la interferencia entre el rayo directo y los rayos que llegan a la antena receptora desde varios ángulos. Por ello, la señal resultante es la suma de una componente constante (señal directa) y otras componentes con amplitud variable y fase aleatoria (Hernando, 2013 pág. 223).

Las fuentes de propagación multitrayecto son: reflexión, difracción y scattering. Algunas de las consecuencias del efecto multitrayecto sobre las señales pueden ser:

- **Decaimiento de la amplitud de la señal:** Es el producto de varias ondas reflejadas que están desfasadas con respecto a la señal principal, y cuyas amplitudes se suman a su señal principal a medida que llegan al mismo tiempo que ella.

La Ilustración 2-7 muestra el decaimiento de la amplitud de la señal.

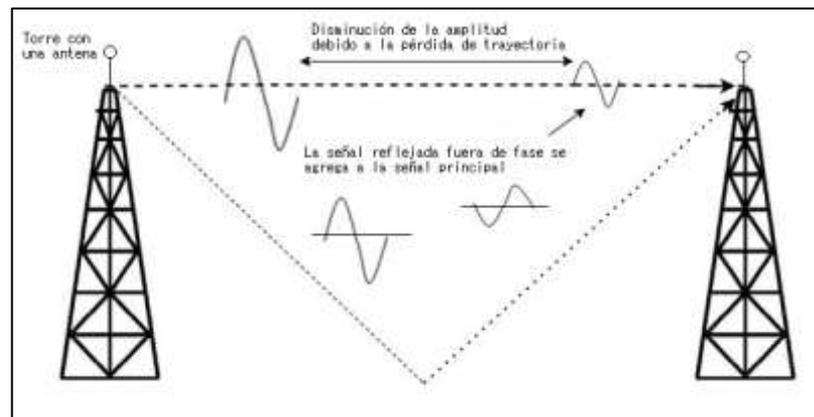


Ilustración 2-7: Decaimiento de la amplitud de la señal

Realizado por: Bonilla E., 2023

- **Corrupción:** Es causado por el mismo fenómeno de reducción de la amplitud de la señal, pero en mayor medida. En este sentido, si se suman las amplitudes de las señales que están desfasadas con respecto a la señal principal, se puede reducir mucho su amplitud en lugar de reducirse ligeramente como en el caso anterior. El resultado es que el receptor no puede decodificar la información transportada en la señal. Además, la relación señal a ruido suele ser baja, lo que hace imposible que el receptor distinga entre el ruido y la información que transporta la señal. La corrupción requiere que la información sea enviada nuevamente (Villapol, 2006 pág. 30).

En la Ilustración 2-8 se muestra la corrupción de una señal.

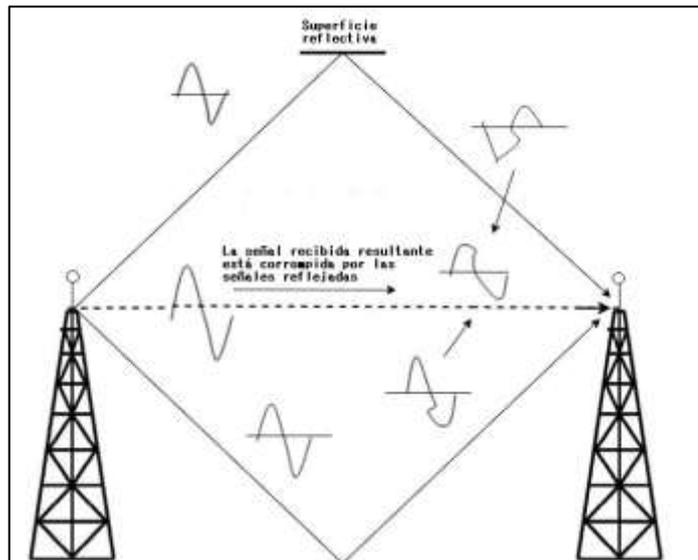


Ilustración 2-8: Corrupción de una señal
Realizado por: Bonilla E., 2023

- **Cancelación:** Ocurre cuando varias ondas reflejadas llegan al receptor fuera de fase y se suman a la señal principal de tal manera que la amplitud de la señal principal se anula. Cuando ocurre este fenómeno, se deben mover componentes como el transmisor, receptor u objetos reflectantes ya que la retransmisión de la señal no resuelve el problema (Villapol, 2006 pág. 32).

En la Ilustración 2-9 se muestra como sucede la cancelación de una señal.

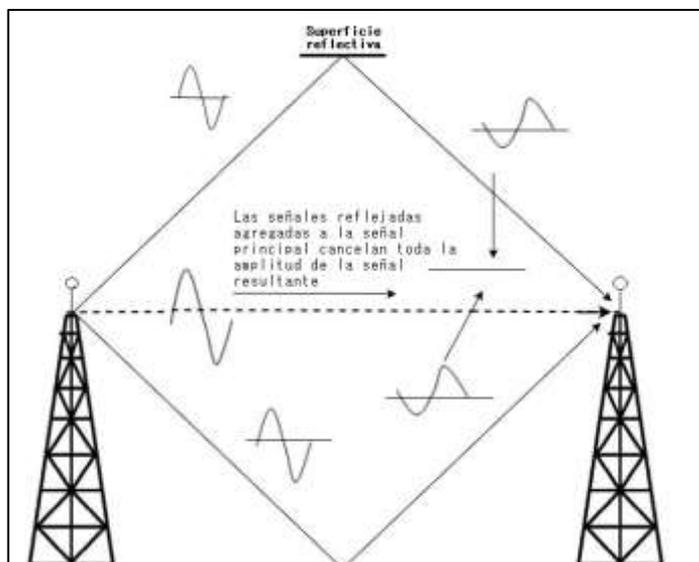


Ilustración 2-9: Cancelación de una señal
Realizado por: Bonilla E., 2023

- **Aumento de amplitud de la señal:** Es el producto de múltiples ondas reflejadas que están en fase con respecto a la señal principal y cuyas amplitudes se suman a la señal principal cuando éstas llegan simultáneamente. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la señal resultante en ninguna circunstancia será más fuerte que la señal transmitida. Lo que puede

pasar es que, el producto de la suma de estas reflexiones dé como resultado una señal más fuerte que la que se produciría si no hubiera multicamino (Villapol, 2006 pág. 34).

En la Ilustración 2-10 se muestra como sucede el aumento de amplitud de la señal transmitida.

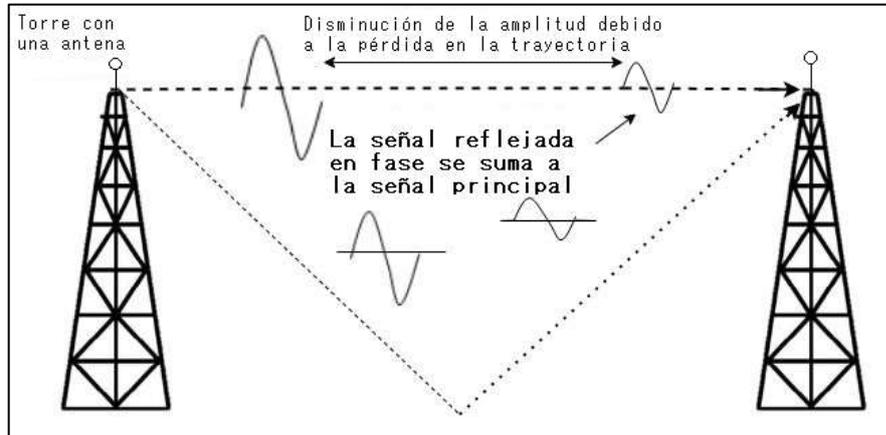


Ilustración 2-10: Aumento de amplitud de la señal

Realizado por: Bonilla E., 2023

2.4 Antena Choke Ring

El plano de tierra tipo choke ring se diseñó originalmente a mediados de 1980, Jet Propulsion Laboratory (JPL) introdujo un diseño de anillos concéntricos que es de uso popular en la actualidad, el cual ha sido adoptado ampliamente por la comunidad geodésica científica. Una antena con chokes se puede definir como aquella que posee una estructura compuesta por una serie de ranuras o corrugaciones axiales (chokes) (Kumar, 1978 págs. 42-46).

Este modelo de plano de tierra consiste en rodear el elemento de la antena central con varios anillos metálicos concéntricos o corrugaciones axiales, todos ellos con una profundidad de $\lambda/4$ y formando un ángulo de 0° con respecto al lóbulo principal, donde la antena central se encierra en un domo protector. El área entre los anillos crea "ranuras" (Coaquila, 2021 pág. 10).

2.4.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de una antena choke ring para GNSS se basa en el tratamiento de ondas directas e indirectas que llegan a la antena. Las ondas directas que llegan a la antena son las deseadas. El objetivo de la antena choke ring es reducir el impacto las señales indeseadas que también llegan a la antena, llamadas señales multicamino (Pérez, 2016 pág. 22).

La señal que recibe la antena tipo choke ring está compuesta por una señal directa y una señal reflejada. Los anillos del plano de tierra no afectan a la señal directa aparte de disminuir la ganancia de la antena en ángulos de elevación por debajo de los 20° , lo que da como resultado la disminución de la intensidad de la señal seguida de una precisión posicional deficiente, pero para

ángulos de elevación altos, el plano de tierra funciona como un plano y los anillos tiene mucho efecto en la señal reflejada desde abajo.

La Ilustración 2-11 muestra cómo se comporta la antena frente al efecto multitrayecto, las flechas de color verde representan las señales deseadas y las flechas de color rojo representan las señales no deseadas.

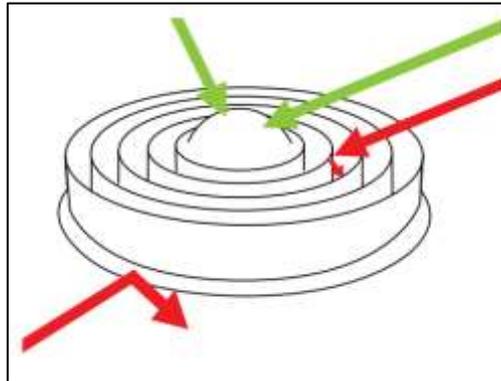


Ilustración 2-11: Antena choke ring frente al efecto multitrayecto
Fuente: Trimble, 2019

De manera más detallada, el campo electromagnético de la señal reflejada en las proximidades del plano de tierra de la choke ring puede verse como la suma de dos ondas de campo. Una es una onda de campo que rodea el plano de tierra a lo largo de una superficie conductora imaginaria S como se muestra en la Ilustración 2-12. Esta onda se une a los bordes superiores de las ranuras y continúa hasta el lado posterior del plano de tierra (JAVAD Navigation Systems, 2007 pág. 1).

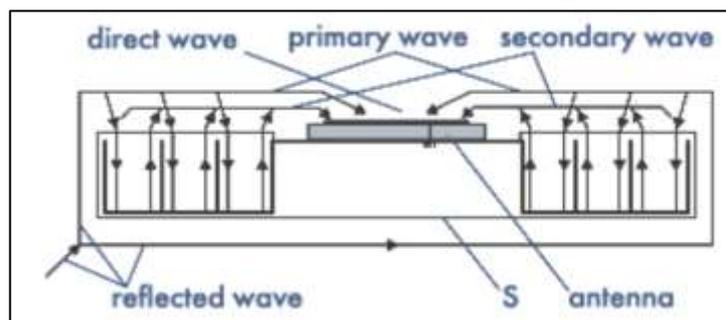


Ilustración 2-12: Ondas de campo en una antena Choke Ring
Fuente: <http://www.javad.com/jns/index.html?jns/technology/Choke%20Ring>

El campo dentro de los anillos se puede ver como la suma de dos ondas. Una onda que se propaga verticalmente hacia las superficies inferiores de las ranuras y puede tratarse como una onda que ingresa a las ranuras desde el exterior. Esta onda es excitada por la onda "primaria" (onda reflejada como si fuera un plano de tierra). La otra onda que se propaga verticalmente a lo largo de las paredes de las ranuras y puede tratarse como una onda reflejada desde las superficies inferiores

de las ranuras hacia el exterior. Esta onda excita la onda "secundaria" (onda reflejada creada por el campo electromagnético de las ranuras) (JAVAD Navigation Systems, 2007 pág. 1).

Estas señales primarias y secundarias reflejadas se propagan hacia la antena receptora y contribuyen a la señal total (señal directa del satélite al elemento de antena). El objetivo del plano de tierra de la choke ring es que las señales reflejadas primarias y secundarias se cancelen sustancialmente entre sí y que la señal directa a la antena permanezca como la señal dominante. Es decir, la cancelación ocurre si la amplitud de las ondas primaria y secundaria son iguales y su diferencia de fase entre sí es de 180° llegando a suprimir así los trayectos múltiples.

La relación de fase entre las señales reflejadas primaria y secundaria a la salida de la antena depende de la diferencia en las longitudes de trayectoria que recorre cada señal, esta diferencia de trayectoria es el doble de la profundidad de las ranuras. En cambio, la relación de amplitud entre las dos señales depende de las características de la antena, ubicación del plano de tierra, ancho y número de anillos.

La antena choke ring se destaca principalmente por que tiene la capacidad para rechazar las señales de trayectos múltiples. Esto ha hecho que la antena se convierta en una de las favoritas cuando se trata de aplicaciones GNSS y radar. En un receptor GPS terrestre, una antena choke ring puede proporcionar mediciones de precisión milimétrica para su uso en mediciones topográficas y geológicas (Trimble, 2019 pág. 3).

2.5 Antenas Microstrip

Las antenas Microstrip empezaron a popularizarse en la década de 1970. Hoy en día las antenas microstrip son muy utilizadas ya poseen muchas ventajas pues todo depende de su diseño, pero el material no llega a ser costoso y se pueden utilizar en muchos ámbitos tanto gubernamentales como comerciales.

Las antenas microstrip presentan delgadez y capacidad de adaptación a distintos tipos de superficies. Además, son antenas simples, muy ligeras, fáciles de diseñar, con un coste de producción bajo, fáciles de transportar, y preparadas para ser integradas en arrays. Por estas razones, los circuitos y antenas microstrip son comúnmente usados para la fabricación de circuitos monolíticos integrados para microondas (MMICs) en aplicaciones civiles, militares, gubernamentales y comerciales como identificación por radio frecuencia (RFID), retransmisión de radio, sistemas de comunicaciones móviles, Global Positioning System (GPS), televisión, comunicaciones satelitales, sistemas de vigilancia, radar, y guiado de misiles entre otros (Hernández, 2008 pág. 32).

Sin embargo, las antenas Microstrip también tiene sus limitaciones como su alto factor de calidad (Q), necesidad de limitar la potencia que atraviesa el circuito, baja eficiencia, baja pureza de polarización y ancho de banda limitado.

2.5.1 Características de las antenas microstrip

Estas antenas están formadas por tres elementos:

Una tira metálica (parche) muy delgada, el plano de tierra y en medio de estos dos se ubica el dieléctrico o sustrato, existen numerosos sustratos que se pueden utilizar para el diseño de antenas microstrip y sus constantes dieléctricas o permitividad relativa suele estar en el rango de $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$.

Cuanto más grueso sea el sustrato (cuya constante dieléctrica se encuentra en el extremo inferior del rango), mejores resultados respecto a ancho de banda y eficiencia se obtendrá, pero la desventaja será la obtención de un tamaño de la antena más grande, la cual puede limitar su uso en ciertas aplicaciones.

En cambio, sustratos finos con valores de permitividad relativa alta son usados para aplicaciones de microondas ya que conducen a tamaños de elementos más pequeños, son perfectos para evitar radiaciones indeseadas y acoplamientos. Sin embargo, tienen mayores pérdidas, son menos eficientes y tienen anchos de banda relativamente pequeños (Balanis, 2016 págs. 784-785).

En la Ilustración 2-13 se muestra una antena tipo microstrip.

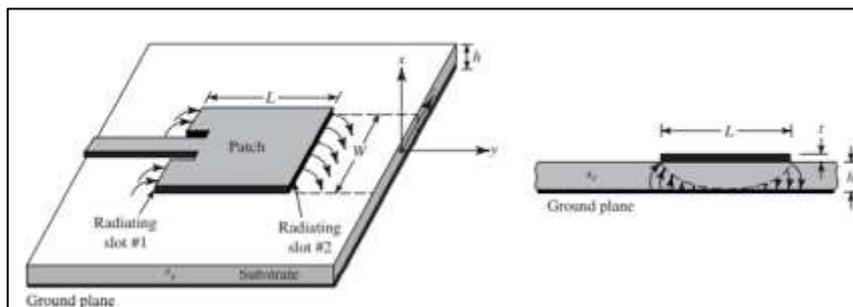


Ilustración 2-13: Antena microstrip

Fuente: Balanis, 2016. pág. 784.

De la Ilustración 2-13 se puede decir que:

L: Longitud del parche.

W: Anchura del parche.

h: Altura o espesor del dieléctrico.

t: Altura o espesor del parche.

ϵ_r : Permitividad relativa

La variable t deber ser mucho menor a la longitud de onda en el espacio libre ($t \ll \lambda_0$), para la variable h generalmente es mucho menor igual a la longitud de onda en el espacio libre y está en el rango ($h \ll \lambda_0, 0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$).

El parche de la antena puede ser cuadrado, rectangular, dipolo, circular, elíptica, triangular o de cualquier otra configuración. Cuadrado, rectangular, dipolo y circular suelen ser los más comunes debido a su facilidad de diseño, análisis e implementación.

2.6 Materiales y equipos

2.6.1 FR4

El sustrato FR4 es un compuesto de fibra de vidrio, resinas con buenas propiedades aislantes e incluso ofrece buena estabilidad térmica y mecánica. El material FR4 induce una serie de efectos en el campo eléctrico que crean trazas y planos de PBC (Placa de Circuito Impreso). El efecto principal es un aumento de la capacitancia debido a la inclusión de un material dieléctrico en el campo eléctrico del material dieléctrico. También se debe considerar que el dieléctrico retrasa la propagación de las señales eléctricas en comparación con la propagación en el vacío. (López, 2006 pág. 122)

La Ilustración 2-14 muestra la estructura del sustrato FR4.

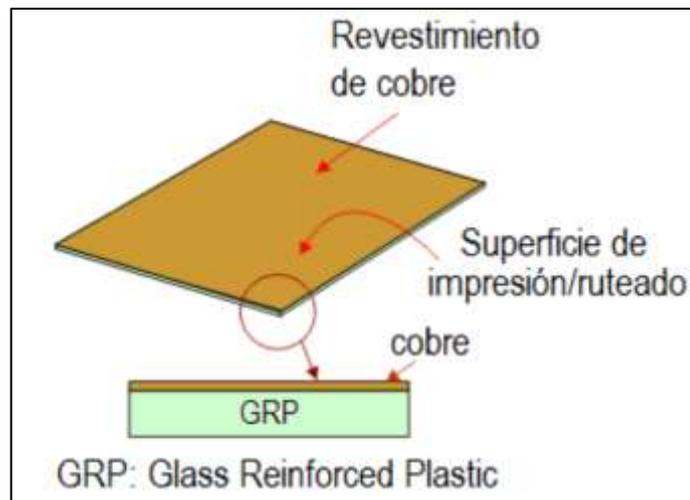


Ilustración 2-14: Sustrato FR4

Fuente: <https://technologystudent.com/pcb/pcbenc.htm>

2.6.1.1 Características

El material FR4 estándar que se utiliza para las implementaciones de este proyecto tiene diferentes características:

- Resistencia al calor de entre 140°C y 150°C.

- El espesor es de 1,6 mm.
- Permitividad relativa de 4.4 (ϵ_r).
- Permeabilidad relativa de 1.
- Tangente de pérdidas de 0.02.

2.6.2 Conector SMA

El conector SMA debido a su pequeño tamaño y bajo precio es uno de los más utilizados para aplicaciones de RF y microondas.

Fue diseñado por la Bendix Scintilla Corporation en 1958 y llamado BRM. Más tarde fue modificado por Omni Spectra en 1962 y llamado OSM. En 1968 se estandarizó dentro de la norma MIL-C-39012 bajo el nombre de Subminiature A. No se considera un conector de precisión ya que hay un dieléctrico de PTFE (politetrafluoroetileno) entre el centro y los conductores exteriores. (Henze, 2011 págs. 14-16). La Ilustración 2-15 muestra los componentes de un conector SMA tipo hembra.

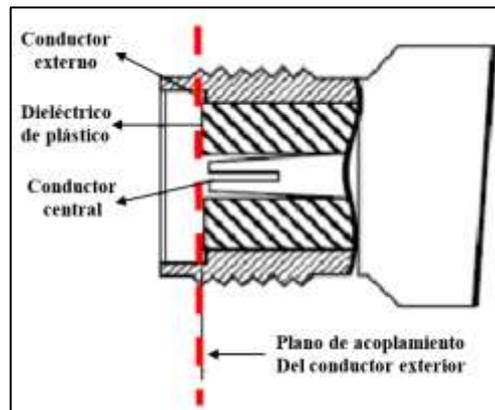


Ilustración 2-15: Corte transversal de un conector SMA hembra

Fuente: Henze, 2011, pág. 15

En la Ilustración 2-16 se observa este tipo de conector el cual se suele utilizar en aplicaciones con líneas Microstrip por la cuestión de peso, precio accesible y tamaño. Algunas de sus características técnicas son del conector SMA tipo hembra son:

- Impedancia de 50 Ohm.
- Frecuencia de trabajo de 0-10 GHz.
- El material conductor es cobre recubierto de oro.
- Su longitud es de 13 mm.
- La longitud de puntada es de 4 mm.
- Su peso es de 2 g.



Ilustración 2-16: Corte SMA hembra
Fuente: <https://electronilab.co/tienda/conector-sma-hembra/>

2.6.3 Generador de señales Anritsu MG3692C

La Ilustración 2-17 presenta el generador de señal de la marca Anritsu de banda ancha de la serie MG3692C de banda ancha. Cubre frecuencias de audio, HF, VHF, UHF, HF y microondas. Por lo tanto, la serie MG3692C es la fuente de señal ideal para los requisitos de RF y microondas y es totalmente configurable para aplicaciones de alta potencia (Anritsu, 2023).

En la Tabla 2-1 se detallan las características técnicas del equipo.

Tabla 2-1: Características técnicas del generador de señales Anritsu MG3692C

Características	
Rango de frecuencia	50 MHz a 20 GHz
Resolución	0.01 Hz
Impedancia de entrada	50 Ω
Nivel de ruido SSB	-119 dB/Hz, salida de 10 GHz, compensación de 10 KHz
Potencia de salida	-120 dBm a + 19 dBm
Nivel de precisión	± 1 dB
Peso	18 kg
Dimensiones	133 x 429 x 450 mm
Rango de temperatura de funcionamiento	0°C – 50°C

Realizado por: Esthefanny B., 2023



Ilustración 2-17: Generador de señales Anritsu MG3692C
Fuente: <https://www.axiomtest.com/documents/models/ANR%20MG3692C%20Datasheet.pdf>

2.6.4 Analizador de espectro radioeléctrico Anritsu MS2724C

En la Ilustración 2-18 se muestra el analizador de espectro radioeléctrico Anritsu MS2724C. Es un analizador portátil basado en un sintetizador que proporciona resultados de medición rápidos y precisos en entornos RF y físicos adversos. Las mediciones se pueden realizar fácilmente utilizando las funciones básicas del instrumento: frecuencia, intervalo, amplitud y ancho de banda.

Algunas de las funciones del equipo son el monitoreo de espectro, comprobación de transmisiones, análisis de interferencias, mediciones de RF y microondas, cumplimiento regulatorio o mediciones de redes inalámbricas y Wi-Fi (Anritsu, 2013 pág. 1).

Algunas de las características técnicas del analizador de espectro se detallan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Características técnicas del analizador de espectro Anritsu MS2724C

Características	
Rango de frecuencia	9 KHz a 20 GHz
Resolución de sintonización	1 Hz
Impedancia de entrada	50 Ω o 75 Ω
Ancho de banda de resolución (RBW)	1 Hz a 10 MHz
Rango de nivel de referencia	-150 dBm a + 30Bm
Peso	3.5 kg
Dimensiones	315 x 211 x 77 mm

Realizado por: Esthefanny B., 2023



Ilustración 2-18: Analizador de espectros Anritsu MG3692C

Fuente: <https://www.leasametric.com/en/product/anritsu-ms2724c/>

2.6.5 Teléfono celular Xiaomi 11 Lite 5G

El Xiaomi 11 Lite 5G se muestra en la Ilustración 2-19. Es uno de los muchos teléfonos GNSS de doble frecuencia que posee la marca Xiaomi, se lanzó en marzo del 2021. Opera en las frecuencias de GPS L1 y L5. Además de que el consumo de GPS se reduce en un 50%. De hecho, después de que Google anunciara la disponibilidad de mediciones GNSS sin procesar se puso a disposición algunos modelos de teléfonos inteligentes con procesadores más potentes de GPS.

Ya que uno de los problemas del GPS tiene que ver con las interferencias por los materiales de los edificios y el entorno mismo. El GPS del Xiaomi 11 Lite 5G recibe señales de los satélites, pero utilizando dos frecuencias diferentes que operan al mismo tiempo. Debido a que son dos longitudes de onda diferentes (L1 y L5), reaccionan de forma distinta ante los objetos que atraviesan.

La triangulación de los pseudorángos calculada por cada frecuencia hace que el GPS sea más preciso a la hora de calcular un punto preciso en la superficie de la Tierra.

Sus características técnicas se detallan en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Características técnicas del Xiaomi 11 Lite 5G

Características	
Redes	2G, 3G, 4G, 5G
Sistema Operativo	Android 13
Interfaz de Usuario	MIUI 14
Procesador	Qualcomm Snapdragon 780G octa-core 2.4 GHz
GPS	Dual (L1 y L5)
Otros Sistemas de Navegación por Satélite	BeiDou, GLONASS, Galileo
RAM	8 GB
GPU	Adreno 642
Peso	159 g
Dimensiones	160.5 x 75.7 x 6.8 mm

Realizado por: Bonilla E., 2023



Ilustración 2-19: Xiaomi 11 Lite 5G – Dual GPS
Fuente: Xiaomi Global, 2018

2.6.6 Teléfono celular Motorola Moto G20

La empresa Motorola lanzó el Motorola Moto G20 en abril de 2021. Ofrece características de línea media baja. Tiene un procesador Unisoc-T700 personalizado para Motorola, un chip de ocho núcleos que corre a 1.8 GHz. Opera a solo una frecuencia para GPS (L1). En la Ilustración 2-20 se muestra este modelo de teléfono móvil.

Sus características técnicas se detallan en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Características técnicas del Motorola Moto G20

Características	
Redes	2G, 3G, 4G
Sistema Operativo	Android 11
Procesador	Unisoc T700 octa-core 1.8 GHz
GPS	Single (L1)
Otros Sistemas de Navegación por Satélite	GLONASS
RAM	4 GB
GPU	Mali G52
Peso	200 g
Dimensiones	165.22 x 75.73 x 9.19 mm

Realizado por: Bonilla E., 2023



Ilustración 2-20: Motorola Moto G20 – Single GPS
Fuente: Motorola, 2022

2.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico es una herramienta para entender y estudiar los datos. Se refiere a una colección de técnicas y métodos para organizar, describir, analizar e interpretar datos y obtener información importante y práctica. (QuestionPro, 2023)

La estadística se utiliza para recolectar y analizar datos con el objetivo de descubrir patrones y tendencias. Este análisis puede ayudar a la toma de decisiones.

2.7.1 Pruebas de normalidad

La normalidad de la población es crucial para muchos procedimientos estadísticos. Por lo tanto, es esencial realizar una prueba de normalidad para confirmar este supuesto antes de continuar con el análisis (Levin et al., 2014). Existen diferentes pruebas para verificar si los datos provienen de una población no normal, tales como:

- Anderson-Darling
- Ryan-Joiner
- Shapiro-Wilk
- Kolmogórov-Smirnov

Las pruebas de normalidad de los datos aseguran la confiabilidad de los análisis estadísticos.

2.7.1.1 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es muy usada para verificar si los datos muestrales se ajustan a una distribución normal, especialmente en procesos físicos no lineales e interactivos donde se

esperan distribuciones no gaussianas. Esta prueba nos ayuda a entender mejor el mecanismo generador de los procesos al examinar la distribución de las variables seleccionadas. Asimismo, algunas pruebas estadísticas necesitan o son mejores bajo la suposición de normalidad y, por ende, es necesario verificar si se cumple este requisito previo. (Steinskog et al., 2007 págs. 1151-1157)

Algunas características de este tipo de prueba son:

- Plantea hipótesis sobre bondad de ajuste
- El nivel de medición de las variables es bajo (ordinal)
- No tiene muchas restricciones
- Se puede usar en muestras pequeñas
- Es robusta

La fórmula para calcular el estadístico de prueba D es la siguiente:

$$D = \max |F(X_i) - \Phi(X_i)|$$

Ecuación 2-5: Valor de D

Donde:

X_i : i-ésimo valor observado en la muestra (cuyo), habiendo sido previamente ordenados los valores de menor a mayor.

$F(X_i)$: Estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales a X_i

$\Phi(X_i)$: Probabilidad de observar valores menores o iguales que X_i cuando la hipótesis nula es cierta.

Por lo tanto, D es la diferencia absoluta máxima observada entre la frecuencia acumulada observada $F(X_i)$ y la frecuencia acumulada teórica $\Phi(X_i)$ obtenida de la distribución de probabilidad dada como hipótesis nula.

Si el valor observado de $F(X_i)$ es similar al $\Phi(X_i)$ esperado el valor de D es pequeño. En cambio, cuanto mayor sea la diferencia entre la distribución empírica $F(X_i)$ y la distribución teórica, mayor será el valor de D. (Ulpge.es págs. 1-10)

2.7.1.2 Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov con la corrección Lilliefors

La distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov no depende de la distribución de la población dada en la hipótesis nula, y se tabulan los valores críticos de este estadístico. Si la distribución postulada es normal y se estiman sus parámetros, los valores críticos se obtienen aplicando la corrección de significación propuesta por Lilliefors. Las tablas estándar utilizadas para la prueba de Kolmogorov-Smirnov son válidas cuando se prueba si un conjunto de

observaciones proviene de una distribución continua completamente especificada. Sin embargo, si es necesario estimar uno o más parámetros a partir de una muestra, las tablas ya no son válidas. (Romero, 2016 págs. 105-114)

La prueba de Lilliefors asume que la media y la varianza son desconocidas porque fue diseñada específicamente para probar la normalidad. Muchos paquetes estadísticos, por ejemplo, SPSS, combinan las dos pruebas como una prueba KS corregida por Lilliefors.

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Introducción

En el presente capítulo se detallan los pasos a seguir para el diseño, simulación e implementación de la antena tipo choke ring low-cost en la banda L de operación. También se especifica el software que se utilizó para la toma de datos como el software para el post procesamiento de los datos GNSS.

El diseño y simulación se realizó en un software de simulación específico para antenas, el cual permitió obtener las gráficas del coeficiente de reflexión y el comportamiento del campo y la corriente superficial dentro de la estructura de anillos.

De igual forma se utilizó el software de simulación para diseñar las antenas parche y monopolo a las frecuencias L1 y L5 de GPS. Para la etapa de implementación de estas antenas se utilizó el material dieléctrico FR4 y conectores SMA tipo hembra.

Para el plano de tierra se utilizó el material PLA (Ácido Poliláctico) y dos diferentes materiales conductores que fueron papel aluminio y cinta de cobre. Finalmente, se evaluó el rendimiento de la antena choke ring low-cost con aluminio y con cobre en ambientes severos de multipath y su efecto en la mitigación del ruido sobre la antena GPS del celular Xiaomi Mi 8 y Motorola G20.

La Ilustración 3-1 muestra un esquema explicativo de todo el proceso que se realizó en el presente trabajo, es decir las etapas de diseño, simulación, implementación y análisis de resultados.

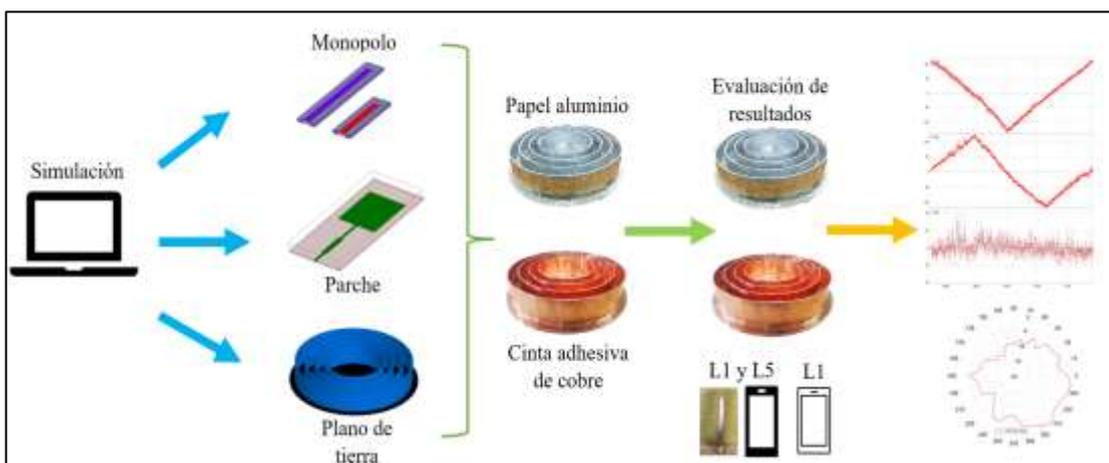


Ilustración 3-1: Etapas de implementación y evaluación de la antena choke ring low-cost
Realizador por: Bonilla E., 2023

3.2 Definición de los parámetros de diseño

Los satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), operan a las frecuencias de:

- Frecuencia portadora L1, a 1575.42 MHz
- Frecuencia portadora L2, a 1227.60 MHz
- Frecuencia portadora L5, 1176 MHz

La estructura reflectora compuesta por los anillos tipo choke ring se diseñó tomando en cuenta las frecuencias L1 y L5 ya que son las más utilizadas dentro de las aplicaciones GNSS comerciales.

Con estos datos se eligió un rango de frecuencias desde 1.15 GHz hasta 1.60 GHz dejando un margen del 10% de variación de los límites.

Para el diseño del plano de tierra se tuvo en cuenta como una referencia, las medidas de una antena choke ring profesional comercial.

Además, se tomó en cuenta que la superficie de anillos tenga una profundidad de al menos $\lambda/4$ ya que de esta manera se bloquea la propagación de una onda plana oblicua cuyo vector de onda es perpendicular a los anillos, independientemente de la dirección del campo eléctrico. (Scire-Scappuzo y Makarov, 2008 pág. 34). En la Ilustración 3-2 se muestran dos tipos de ondas planas TEM, etiquetadas como tipo I y tipo II. Las ondas planas oblicuas de tipo I a menudo se designan como ondas planas TE_z y de manera similar las ondas planas oblicuas tipo II son las ondas planas TM_z .

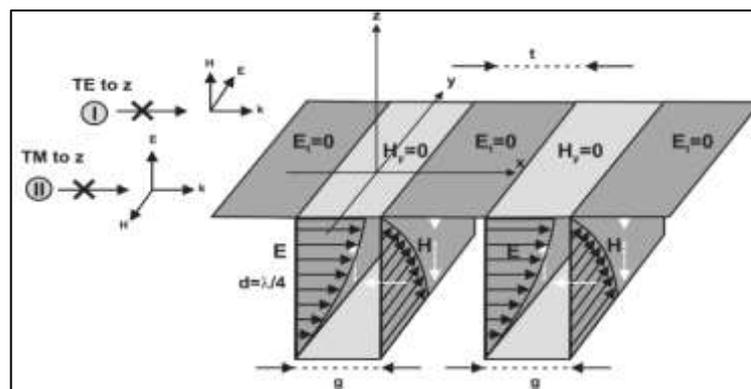


Ilustración 3-2: Superficie corrugada en base a resonadores $\lambda/4$
Fuente: Sciré-Scappuzo y Makarov, 2008, pág. 34

La superficie de anillos anula las ondas de tipo I y tipo II de manera muy eficiente ya que $E_t = 0$ y $H_t = 0$ y por lo tanto no pueden propagarse a lo largo de los anillos.

Si se tienen las frecuencias de banda inferior (f_L) y superior (f_U) entonces la profundidad de la superficie reflectora de anillos debe cumplir la condición $\lambda_L/4 \leq d \leq \lambda_U/2$ para suprimir las

ondas de superficie y cualquier otra onda plana que se propague perpendicularmente al plano reflector.

Por ello, la profundidad de la superficie reflectora (d), que detalla en la Ecuación 3-1, debe ser mayor que el cuarto de longitud de onda más grande, en este caso, el cuarto de longitud de onda en la banda L5 de GPS centrada en 1176 MHz.

$$d \geq \lambda_{1176\text{MHz}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{(1176 \text{ MHz})(4)} = 63,77 \text{ mm}$$

Ecuación 3-1: Profundidad de la superficie reflectora a la frecuencia 1176 MHz

Al mismo tiempo, la profundidad debería ser menor que $\lambda/2$ en la frecuencia más alta, en este caso, la mitad de la longitud de onda en la banda L1 de GPS centrada en 1575.42 MHz. Como se detalla en la Ecuación 3-2.

$$d \geq \lambda_{1575.42\text{MHz}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{(1575.42 \text{ MHz})(2)} = 95,21 \text{ mm}$$

Ecuación 3-2: Profundidad de la superficie reflectora a la frecuencia 1575,45 MHz

Por lo tanto, la Ecuación 3-3 muestra el rango de variación del parámetro d .

$$63,77 \text{ mm} \leq d \leq 95,21 \text{ mm}$$

Ecuación 3-3: Profundidad de la superficie reflectora

Otra de las condiciones que debe cumplir un plano reflector tipo choke ring es la desigualdad geométrica (Kildal, 1990 pág. 1541). Esta desigualdad implica que los anillos no pueden ser muy anchos, como se detalla en la Ecuación 3-4.

$$g + t < \lambda/2$$

Ecuación 3-4: Desigualdad geométrica

Donde:

g : ancho de la profundidad

t : ancho del anillo

Según Sciré-Scappuzzo y Makarov (2008, págs. 37-38), el rendimiento del reflector tipo choke ring aumenta proporcionalmente al tamaño del plano de tierra. Desde el punto de vista de la relación rendimiento-tamaño, el tamaño más beneficioso resulta ser $G \approx 1.5\lambda$.

Para las frecuencias de operación clásicas de GPS el tamaño de elección para las antenas geodésicas clásicas tradicionalmente ha sido de alrededor de 38 cm. (Trimble, 2019)

El número de anillos de corrugación es la proporción redondeada del radio del anillo, $G/2$, menos el radio de la cavidad, R , dividido para el período del anillo, $g + t$. El resultado es aproximadamente 4 anillos, utilizando la Ecuación 3-5.

$$\frac{\left(\frac{G}{2} - R\right)}{g + t}$$

Ecuación 3-5: Número de anillos

La Tabla 3-1 proporciona los valores que se utilizaron para la simulación del plano de tierra tipo choke ring para una geometría de cuatro anillos.

Tabla 3-1: Parámetros de la configuración del plano de tierra tipo choke ring

Parámetro	Variable	Valor (mm)
Diámetro de la estructura	G	380
Radio central	R	85
Separación entre anillos	s	25
Período de los anillos	g+t	28
Grosor de los anillos	t	3
Profundidad del anillo	d	63
Banda de trabajo	-	Banda L (L1 y L5)

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 3-3 se muestra el diseño esquemático del plano de tierra tipo choke ring.

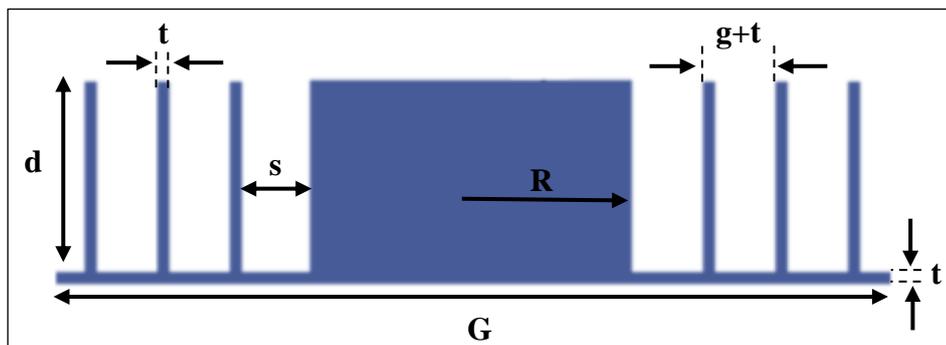


Ilustración 3-3: Diseño esquemático plano de tierra tipo choke ring

Realizado por: Bonilla E., 2023

3.3 Simulación del plano de tierra

El diseño en 3D se realizó en un software de simulación de antenas, utilizando las medidas que se detallaron en la Tabla 1-3.

Para la simulación, se asignó al material del diseño como conductor perfecto. Es decir que su permitividad relativa es de 1 ($\epsilon_r = 1$) y las pérdidas dieléctrica tangencial y magnética son 0.

La Ilustración 3-4 muestra el diseño del reflector tipo choke ring desde diferentes perspectivas.

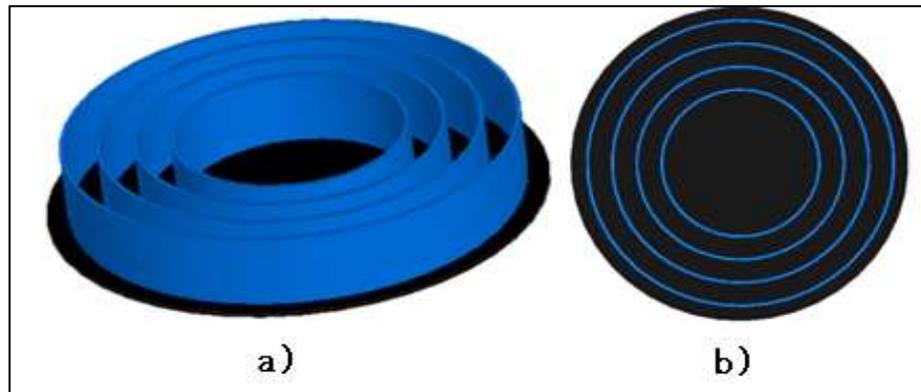


Ilustración 3-4: Diseño plano de tierra choke ring. a) Vista 3D b) Vista 2D
Realizado por: Bonilla E., 2023

3.4 Implementación del plano de tierra tipo choke ring

3.4.1 Especificaciones de los materiales

En cuanto a la construcción de la antena, el presente estudio se centró en varios materiales, seleccionados de acuerdo con sus propiedades, los cuales se detallan a continuación:

3.4.1.1 Ácido Poliláctico (PLA)

El filamento PLA es uno de los materiales de impresión 3D más populares y ampliamente utilizado para las impresoras 3D, es fácil de imprimir en comparación con otros materiales. Además, el PLA se considera un componente sostenible ya que se obtiene a partir de materias primas naturales y renovables como el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Pertenece al poliéster como polímero sintético. (Campozano y Riera, 2022 págs. 42-53)

Cargill fue una de las primeras empresas en desarrollar polímeros de ácido poliláctico. *Cargill* comenzó a investigar la tecnología de producción de PLA en 1987 y comenzó a fabricar equipos en 1992.

Algunas de sus características son:

- Polímero permanente e inodoro
- Resistente a la humedad y a la grasa
- La fuerza extensible y el módulo elástico del PLA son comparables al polietileno
- Es más hidrofílico y tiene menor densidad (1.25 g/cm^3)
- Resistente a los rayos UV
- Su inflamabilidad es muy baja

- Puede formularse como rígido o flexible y copolimerizado con otros materiales
- Su punto de fusión es de 120 a 170 °C

En la Ilustración 3-5 se puede observar el material PLA.



Ilustración 3-5: Filamento PLA
 Fuente: <https://www.dvdi.es/es/filamento-3d-pla>

3.4.1.2 *Papel Aluminio*

El papel aluminio presentado en la Ilustración 3-6, es una hoja muy delgada de aluminio, de menos de 0.2 mm de espesor. Por lo tanto, la hoja de metal es muy flexible y se puede doblar o se puede usar para envolver objetos fácilmente. Sin embargo, este producto es frágil y se daña fácilmente, por lo que comúnmente se combina con otros materiales como plástico o papel y se lamina para hacerlo más resistente.

Algunas de sus características son:

- Conductor de calor y electricidad
- Resistente a la corrosión
- Alta conductividad (62 %)
- No tóxico
- Baja densidad (0.00271 g/cm^3)
- Su punto de fusión es de 660 °C
- No es magnético

Además, posee una alta reflectividad en el espectro electromagnético de las ondas de radio y en el rango infrarrojo y térmico. Refleja aproximadamente el 80% de la luz y este material es reciclable.



Ilustración 3-6: Papel Aluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

3.4.1.3 *Cinta de cobre*

Es una cinta de apantallamiento con adhesivo conductor. Cuenta con un soporte de lámina de cobre suave con un adhesivo acrílico conductor de electricidad sensible a la presión que garantiza una fuerte adherencia. El respaldo de la cinta de lámina de cobre ofrece una excelente resistencia a la oxidación y la decoloración.

Las partículas adhesivas conductoras aseguran una baja resistencia entre el sustrato y el soporte. Esta cinta ignífuga está diseñada para la conexión a tierra y la protección contra EMI (Interferencias Electromagnéticas) de equipos, componentes, etc.

La cinta adhesiva de cobre se puede troquelar, procesar, perforar, moldear de forma personalizada de acuerdo con lo que se requiera. Se encuentra disponible en varios espesores.

Otras características que presenta la cinta son:

- Blindaje EMI y RFI
- Baja resistencia
- Excelente extensibilidad
- Densidad (8.93 g/cm^3)
- Punto de fusión ($1083 \text{ }^\circ\text{C}$)

La Ilustración 3-7 muestra la cinta de cobre utilizada con un espesor de 0.06 mm. Además de que sus dimensiones son de 3 cm x 20.1168 m.



Ilustración 3-7: Cinta adhesiva de cobre

Fuente: <https://n9.cl/h7lxz>

3.4.2 Método de fabricación

Una vez establecido, mediante el proceso de simulación el diseño final del reflector tipo choke ring, se procede a su implementación.

Para realizar el desarrollo de la impresión 3D se realizó la exportación del archivo del software de simulación de antenas al formato de AutoCAD para realizar correcciones de facetas y mejorar la calidad de exportación con las herramientas que nos brinda el software. La Ilustración 3-8 muestra el diseño final del reflector tipo choke ring en AutoCAD.

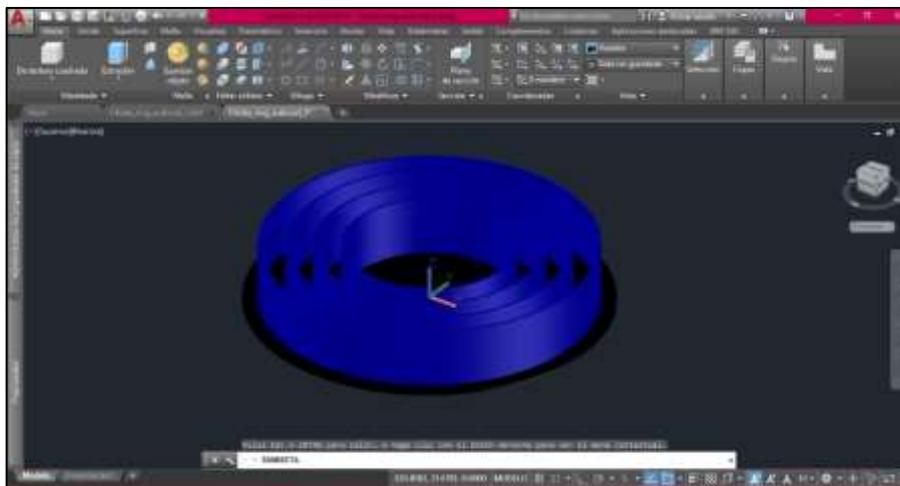


Ilustración 3-8: Diseño en 3D de Choke ring en el software AutoCAD

Realizado por: Bonilla E., 2023

A continuación, se procedió a exportar el archivo tipo .dxf al de tipo .stl para obtener el diseño en el software de impresión 3D denominado Ultimaker Cura. En este software se asignó el material de impresión PLA (ácido poliláctico) con un grosor de 0.5 mm.

En la Ilustración 3-9 se observa el material asignado y el tiempo de impresión que se llevó a cabo (1 día 6 horas 49 minutos).

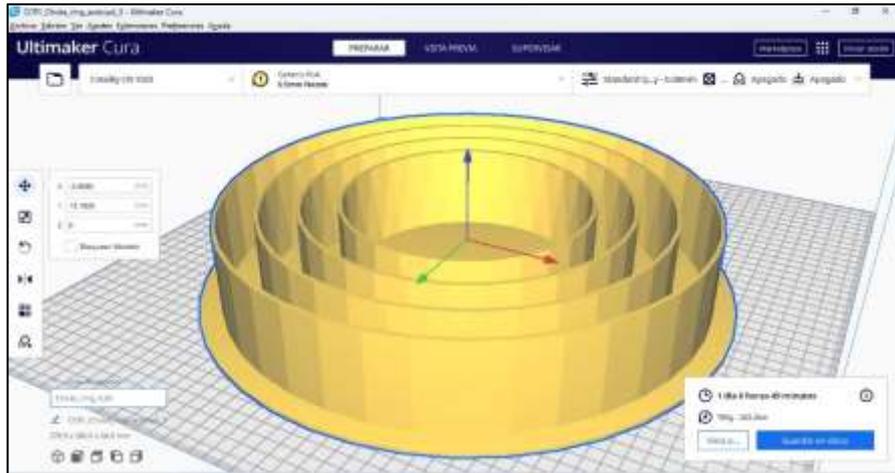


Ilustración 3-9: Asignación del material PLA y visualización del tiempo de impresión

Realizado por: Bonilla E., 2023

La Ilustración 3-10 muestra la vista de impresión del diseño.

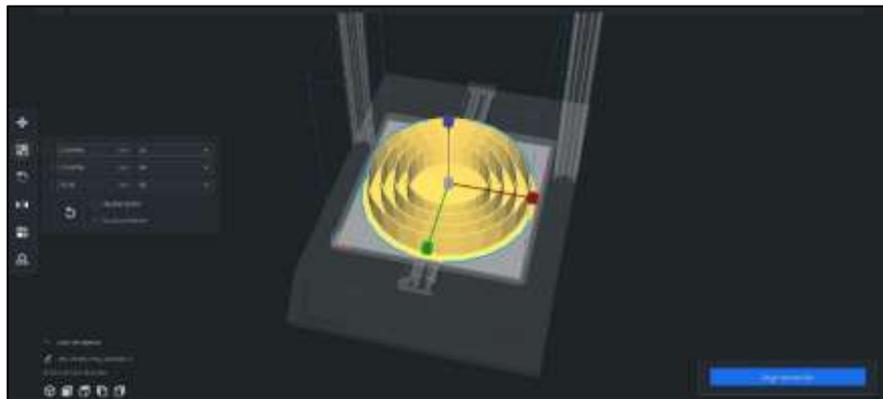


Ilustración 3-10: Vista de impresión del modelo 3D de la Choke Ring

Realizado por: Bonilla E., 2023

Una vez impreso el diseño, se obtiene el producto final en PLA mostrado en la Ilustración 3-11.

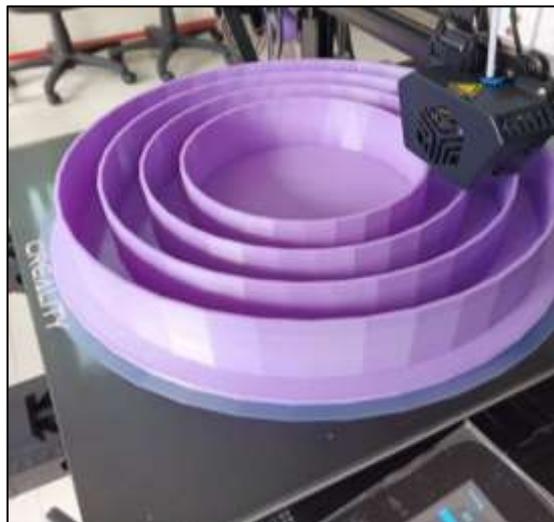


Ilustración 3-11: Choke ring en PLA

Realizado por: Bonilla E., 2023

Para la primera fase de pruebas se utilizó el papel aluminio para recubrir toda la superficie de la choke ring como se muestra en la Ilustración 3-12.



Ilustración 3-12: Estructura de la Choke ring recubierta con papel aluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

Para la segunda fase de pruebas en cambio, se utilizó la cinta adhesiva de cobre para recubrir toda la superficie de la choke ring como se muestra en la Ilustración 3-13.

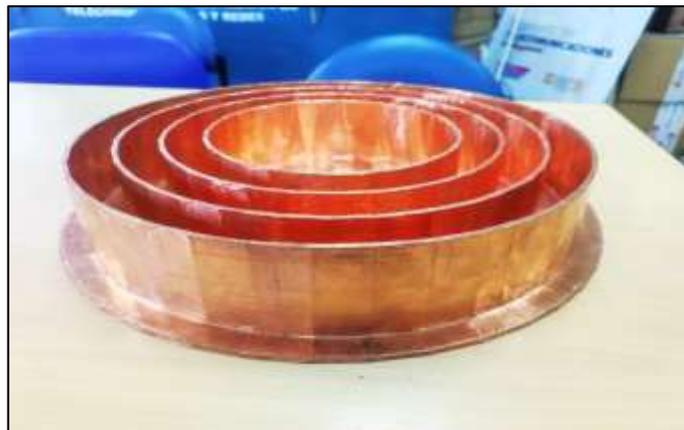


Ilustración 3-13: Estructura de la Choke ring recubierta con cinta adhesiva de cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

3.5 Antenas para la obtención de datos

Para realizar el proceso de comprobación del funcionamiento de la antena choke ring low-cost se simuló e implementaron antenas tipo parche y monopolo para obtener sus patrones de radiación. Además de que se usaron antenas comerciales GNSS para el mismo propósito.

3.5.1 Antenas patch

Para el diseño de las antenas parche a L1 y L5 se utilizó la forma cuadrada con las medidas obtenidas a partir de las frecuencias de 1575.42 MHz y 1176 MHz respectivamente. Con las Ecuaciones 3-6 y 3-7 se inició la creación de los diseños para las antenas transmisoras, estas

medidas fueron acopladas a $\lambda/2$ para la reducción del tamaño de las antenas, también se aplicaron los conceptos de acopladores $\lambda/4$ para acoplar la impedancia del puerto a 50Ω .

Las Ilustraciones 3-14 y 3-15 muestran los diseños principales de las antenas patch cuadradas para cada frecuencia de la banda L de GPS, en el material FR4.

$$\lambda_{L1} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r f}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.4(1575.42 \times 10^6)}} = 90.78 \text{ mm} \rightarrow 45.39 \text{ mm}$$

Ecuación 3-6: Dimensión del parche cuadrado a L1.

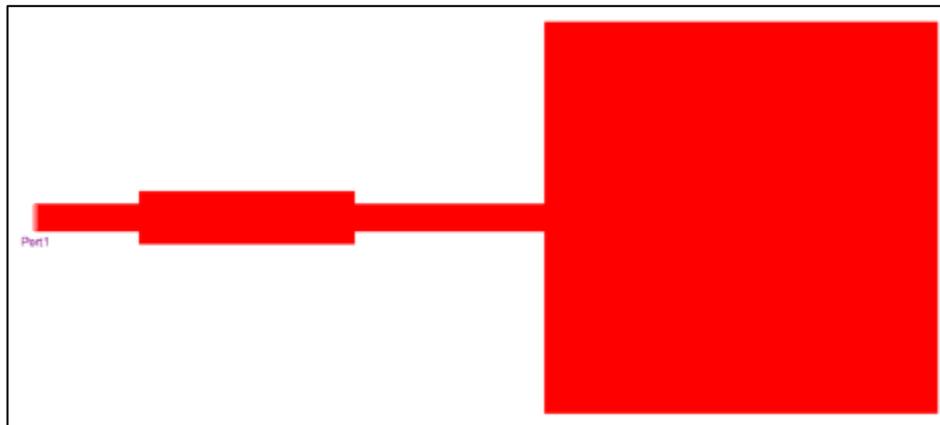


Ilustración 3-14: Diseño de la antena parche a L1.

Realizado por: Bonilla E., 2023

$$\lambda_{L5} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r f}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.4(1176 \times 10^6)}} = 121.61 \text{ mm} \rightarrow 60.81 \text{ mm}$$

Ecuación 3-7: Dimensión del parche cuadrado a L5.

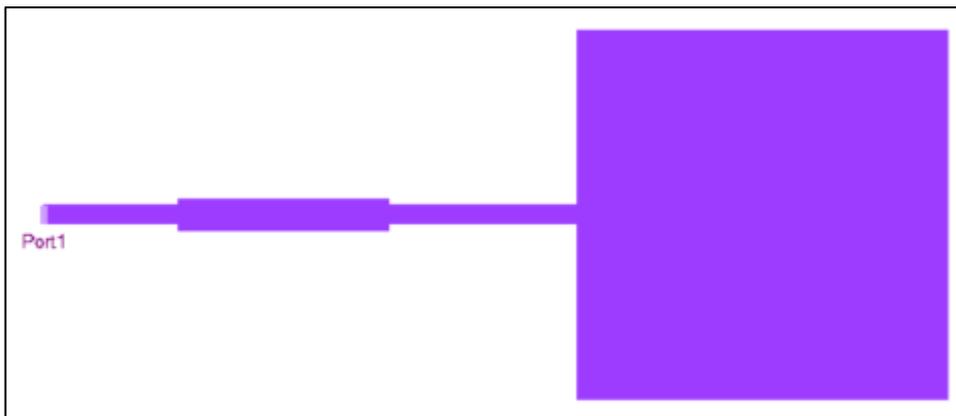


Ilustración 3-15: Diseño de la antena parche a L5.

Realizado por: Bonilla E., 2023

Para la etapa de implementación se utilizó el material FR4 con los conectores SMA tipo hembra como se muestra en la Ilustración 3-16. Estas antenas simulan ser las transmisoras a las frecuencias de portadora de GPS.



Ilustración 3-16: Antenas parche diseñadas en la banda L de GPS.

Realizado por: Bonilla E., 2023

3.5.2 Antenas monopolo

Para el diseño de las antenas monopolo a L1 y L5 se obtuvieron sus dimensiones en base a las frecuencias de 1575.42 MHz y 1176 MHz respectivamente. Mediante la Ecuación 3-8 de longitud de un monopolo se inició la creación de los diseños para las antenas receptoras, las medidas fueron optimizadas durante la simulación para obtener el coeficiente reflexión a la frecuencia deseada. La impedancia del puerto fue de 50 Ω .

$$L_{monopolo} = \frac{\lambda}{4}$$

Ecuación 3-8: Longitud del monopolo

La Ilustración 3-17 muestra los diseños principales de las antenas monopolo para cada frecuencia de la banda L de GPS, en el material FR4.

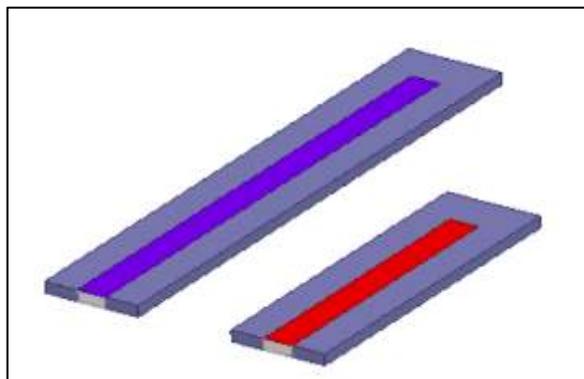


Ilustración 3-17: Antenas monopolo diseñadas en la banda L de GPS.

Realizado por: Bonilla E., 2023

Para la etapa de implementación se utilizó el material FR4 con los conectores SMA tipo hembra como se muestra en la Ilustración 3-18. Estas antenas simulan ser las receptoras a las frecuencias de portadora de GPS.



Ilustración 3-18: Antenas monopolo implementadas en la banda L de GPS.
Realizado por: Bonilla E., 2023

3.5.3 Antena U-blox Serie ANN-MB

La antena U-blox ANN-MB es una antena GNSS de alta precisión multibanda (L1/L2/E5b/B2I). Es compatible con GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.

Está diseñada específicamente para aplicaciones GNSS que requieren información de ubicación de alta precisión. Su diseño es compacto y tiene opciones de montaje y conexión. Posee una excelente relación precio-rendimiento y cuenta con una antena parche de doble alimentación RHCP multibanda de alto rendimiento, además de un LNA de alta ganancia integrado con un pre filtrado SAW y un cable de antena de 5 m con tres opciones de conector (SMA, SMB, MCX). En la Tabla 3-2 se detallan algunas características técnicas de la antena U-blox. (u-blox, 2023)

Tabla 3-2: Características técnicas de la antena U-blox Serie ANN-MB

Parámetro	Banda L1	Banda L2/E5b/B2I
Frecuencia	1559 – 1606 MHz	1197 – 1249 MHz
Impedancia	50 Ω	
Ganancia (antena patch)	3.5 dBic	0-2.0 dBic
Ganancia (LNA)	21.4 dB	21.4 – 22.4 dB
Polarización	RHCP	
Peso	173 g	
Tamaño	82.0 x 60.0 x 22.5 mm ³	
Temperatura de operación	-40 a +85 °C	

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 3-19 se muestra la antena U-blox.



Ilustración 3-19: Ublox ANN-MB multiband GNSS
Fuente: u-blox, 2023

3.5.4 Antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band

ArduSimple es el fabricante de la antena GNSS cuatribanda (L1/L2/L5/L6). La antena contiene un cable resistente de 1.5 m con conector TNC a SMA. Esta antena es ideal para aplicaciones topográficas que incluyen PPK, post procesamiento y también para receptores compatibles con la banda L.

En la Tabla 3-3 se detallan algunas características técnicas de la antena de triple banda + L-band.

Tabla 3-3: Características técnicas de la antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band

Parámetro	Descripción
Bandas soportadas	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS, Navic, L-band, SBAS
Polarización	RHCP
Ganancia máxima	5.5 dBi
Impedancia	50 Ω
Peso	410 g
Temperatura de operación	-40 a +85 °C

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 3-20 se muestra la antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band



Ilustración 3-20: Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band
Fuente: ArduSimple, 2023

3.6 Geo++ RINEX Logger

Geo++ GmbH Company lanzó a principios de 2017 la aplicación móvil Geo++ RINEX Logger, la cual utiliza los últimos servicios API de Android para registrar datos de medición GNSS sin procesar como pseudorange, rangos delta acumulativos, frecuencias Doppler y valores de ruido del dispositivo móvil en archivos RINEX para que luego puedan ser procesados por un software PPP-RTK profesional. Hasta ahora la aplicación móvil es compatible con L1/L5/E1B/E1C/E5A GPS/GLONASS/GALILEO/BDS/QZSS (según lo admita el dispositivo). La aplicación es gratuita y está disponible en Google Play Store en su versión 2.1.6. La Ilustración 3-21 muestra la interfaz principal “Monitor” que una vez que la aplicación esté abierta, comienza a buscar satélites visibles. De todos ellos, considera aquellos sincronizados para obtener una medición de mejor calidad.



Ilustración 3-21: Monitor de Geo++ RINEX Logger
Realizado por: Bonilla E., 2023

Para el proceso de la toma de datos de GNSS sin procesar se tiene la interfaz “Settings”, donde se pudo configurar el nombre de las diferentes pruebas y cambiar el modo Kinematic o Static. En la Ilustración 3-22 se muestra la interfaz de configuración. Los archivos registrados por la aplicación después de la toma de mediciones se almacenan en la ruta .../Geo++/Geo++ RINEX Logger/ dentro del dispositivo móvil.



Ilustración 3-22: Configuraciones de Geo++ RINEX Logger
Realizado por: Bonilla E., 2023

3.7 Software para el procesamiento de datos GNSS RTKLIB

RTKLIB es un paquete de software de código abierto para posicionamiento estándar y preciso utilizando GNSS. RTKLIB consta de una biblioteca de programas portátiles y varios AP (programas de aplicación) que utilizan esta biblioteca. Proporciona muchas funciones de biblioteca y API para el procesamiento de datos GNSS como funciones de sistema de navegación y satélite, modelos de posicionamiento, funciones RINEX, convertidor KML de Google Earth, etc. (Escobar et al., 2020 págs. 230-239)

Algunas de sus características principales son:

- Admite algoritmos de posicionamiento estándar y precisos con constelaciones como GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou y SBAS.
- Admite varios modos de posicionamiento con GNSS tanto para tiempo real como para post procesamiento: Sencillo, DGPS/DGNSS, Cinemático, Estático, Línea base móvil, Fijo, PPP-Cinemático, PPP-Estático y PPP-Fijo.
- Admite muchos formatos y protocolos estándar para GNSS como RINEX 2.10, 2.11, 2.12 OBS/NAV/GNAV/HNAV/QNAV, RINEX 3.00, 3.01, 3.02 OBS/NAV, RINEX 3.02

CLK, RTCM ver. 2.3, RTCM ver. 3.1, BINEX, NTRIP 1.0, RTCA/DO-229C, NMEA 0183, SP3-c, ANTEX 1.4, IONEX 1.0, NGS PCV, EMS 2.0.

- Soporta comunicación externa a través de: Serial, TCP/IP, NTRIP, local log file (record and playback) y FTP/HTTP.

En la Tabla 3-4 se detallan las funciones AP GUI (Interfaces Gráficas de Usuario) de RTKLIB.

Tabla 3-4: Funciones de RTKLIB

Función	GUI AP
Iniciador	RTKLAUNCH
Posicionamiento en tiempo real	RTKNAVI
Servidor de comunicaciones	STRSVR
Análisis de post procesamiento	RTKPOST
Convertidor RINEX	RTKCONV
Soluciones de gráficos y datos de observación	RTKPLOT
Descargador de datos GNSS	RTKGET
Navegador NTRIP	NTRIP

Realizado por: Bonilla E., 2023

A continuación, se detallan las funciones que se utilizaron para el procesamiento de datos GNSS.

3.7.1 RTKLAUNCH

Se refiere a la pantalla de inicio donde se ofrece la posibilidad de lanzar las demás funciones del software. La Ilustración 3-23 muestra la interfaz de inicio de RTKLIB.

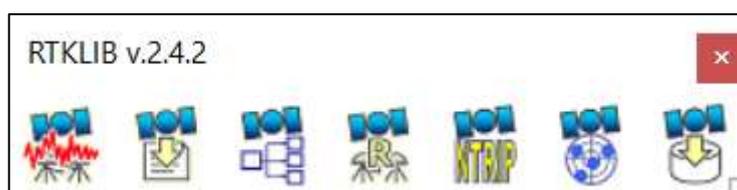


Ilustración 3-23: Pantalla principal de RTKLAUNCH

Realizado por: Bonilla E., 2023

3.7.2 RTKPOST

La herramienta RKTPOST sirve para realizar el post procesamiento de registros sin procesar. Para este proceso se necesitan dos tipos de archivos de entrada RINEX, el archivo de observación (.o) que se obtuvo del proceso de la toma de datos a través de la aplicación Geo++ RINEX Logger.

El archivo de observación es más importante y, por lo tanto, tiene mayor peso de almacenamiento. Aquí se encuentran las pseudodistancias medidas en metros. Contiene información de las

observables por cada satélite y constelación, además de las características del receptor y la antena utilizada en campo, intervalo de tiempo de la data capturada, hora de inicio y final de las observaciones, etc. En la Ilustración 3-24 se muestra un ejemplo de un archivo RINEX de tipo observación.

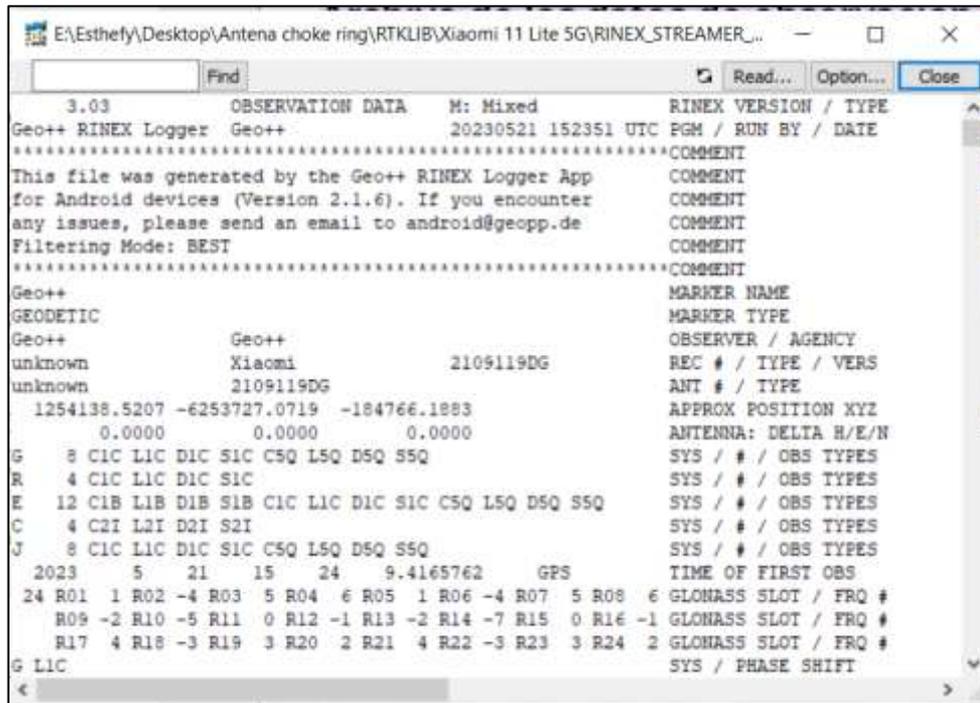


Ilustración 3-24: Archivo de observación
Realizado por: Bonilla E., 2023

El otro tipo de archivo es el de navegación (.N) el cual se obtuvo a partir de los archivos de las estaciones permanentes que proporciona el Instituto Geográfico Militar del Ecuador. El IGM provee los archivos de navegación de las estaciones permanentes de todo el país para su posterior procesamiento. En la Ilustración 3-25 se muestra la interfaz del sitio web del IGM.

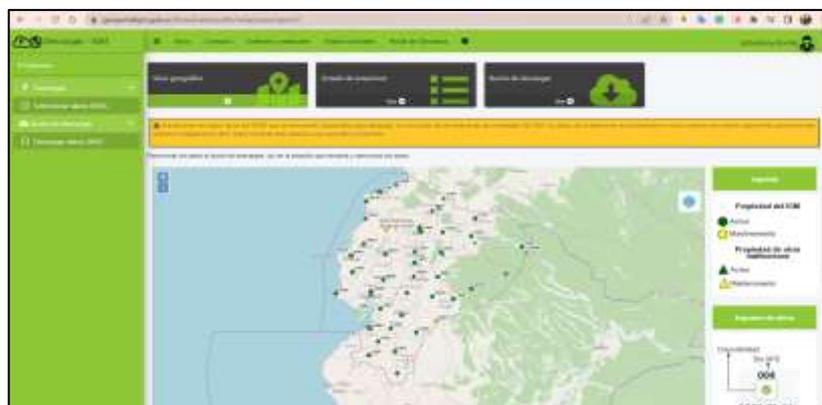


Ilustración 3-25: Interfaz del sitio web del IGM - Ecuador
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 3-26 se muestra un ejemplo de un archivo RINEX de navegación. El cual contiene datos orbitales, parámetros de reloj, precisión de las medidas de pseudodistancias de satélites observados, parámetros de modelos ionosféricos, correcciones de tiempo GPS y UTC.

```

2.11 NAVIGATION DATA GPS(GPS) RINEX VERSION / TYPE
cnvtToRINEX 3.14.0 convertToRINEX OPR 20230522 151934 UTC PGM / RUN BY / DATE
gfzrnk-1.16-8177 HEADER EDIT 20230522 152206 UTC COMMENT
----- COMMENT
0.2049E-07 0.2235E-07 -0.1192E-06 -0.1192E-06 ION ALPHA
0.1229E+06 0.1147E+06 -0.1966E+06 -0.1311E+06 ION BETA
0.000000000000D+00 0.888178419700D-15 61440 2262 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
18 LEAP SECONDS
END OF HEADER
13 23 05 19 00 00 0.0 0.521871261299D-03 0.534328137292D-11 0.000000000000D+00
0.560000000000D+02-0.387500000000D+01 0.491020452973D-08 0.281790681713D+00
-0.149011611938D-07 0.693818111904D-02 0.459700822830D-05 0.515365928268D+04
0.432000000000D+06 0.186264514923D-08-0.155057379430D+01 0.298023223877D-07
0.969254686674D+00 0.291875000000D+03 0.907800429852D+00-0.832070373357D-08
-0.242152943785D-09 0.100000000000D+01 0.226200000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.111758708954D-07 0.560000000000D+02
0.424818000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
15 23 05 19 00 00 0.0 0.407877378166D-04 0.341060513165D-11 0.000000000000D+00
0.260000000000D+02 0.169375000000D+02 0.587060167698D-08-0.286744485133D+00
0.111199915409D-05 0.148730053334D-01 0.455789268017D-05 0.515371037102D+04
0.432000000000D+06-0.104308128357D-06-0.182899074993D+01 0.104308128357D-06
0.931946921181D+00 0.274843750000D+03 0.119631407741D+01-0.895072997669D-08
0.982183769039D-10 0.100000000000D+01 0.226200000000D+04 0.000000000000D+00
0.200000000000D+01 0.000000000000D+00-0.107102096081D-07 0.260000000000D+02
0.424818000000D+06 0.400000000000D+01 0.000000000000D+00 0.000000000000D+00
18 23 05 19 00 00 0.0-0.271945260465D-03-0.156887836056D-10 0.000000000000D+00

```

Ilustración 3-26: Archivo de navegación
Realizado por: Bonilla E., 2023

Para el procesamiento de las mediciones se utilizó la estación permanente en la ciudad de Riobamba denominada EERSA ubicada en la terraza del edificio antiguo de la Empresa Eléctrica de Riobamba S.A.

Esta estación permanente pertenece también a la Red SIRGAS Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

Algunos otros detalles de la estación permanente se presentan en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Datos de la estación fija EREC-EERSA

Parámetro	Datos
Código	EREC
Fecha de instalación	14/06/2013
Coordenadas de la ubicación	Latitud: 1° 40' 16.2199" S Longitud: 78° 39' 04.3953" W
Altitud	2801.366 m
Receptor	Trimble NET R9
Antena	TRM55971.00

Realizado por: Bonilla E., 2023

A continuación, se detallan los pasos para el procesamiento de los archivos de observación y navegación:

1. Abrir la ventana de la herramienta RTKPOST
2. En el apartado "RINEX OBS" se debe cargar el archivo de tipo observación proporcionado por la aplicación Geo++ RINEX Logger (.o)
3. En el siguiente apartado se debe cargar el archivo de navegación (obtenido del Instituto Geográfico Militar IGM) (.N)
4. En el menú "Options" se elige el modo de posicionamiento "Single".
5. Para el caso de las mediciones con el teléfono celular Motorola Moto G20 se eligen los sistemas de posicionamiento GPS y GLONASS.
6. Para el caso de las mediciones con el teléfono celular Xiaomi 11 Lite 5G se eligen los sistemas de posicionamiento GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou.
7. Dar clic en la opción "Execute".
8. Dar clic en la opción "Plot".

La Ilustración 3-27 muestra la interfaz de RTKPOST donde se cargaron los archivos de observación y navegación respectivamente.

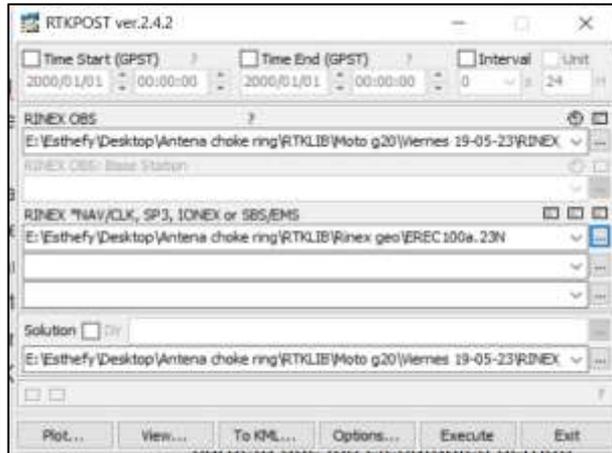


Ilustración 3-27: Pantalla principal de RTKPOST
Realizado por: Bonilla E., 2023

La Ilustración 3-28 muestra la ventana “Options” para la configuración del modo y los sistemas de posicionamiento.

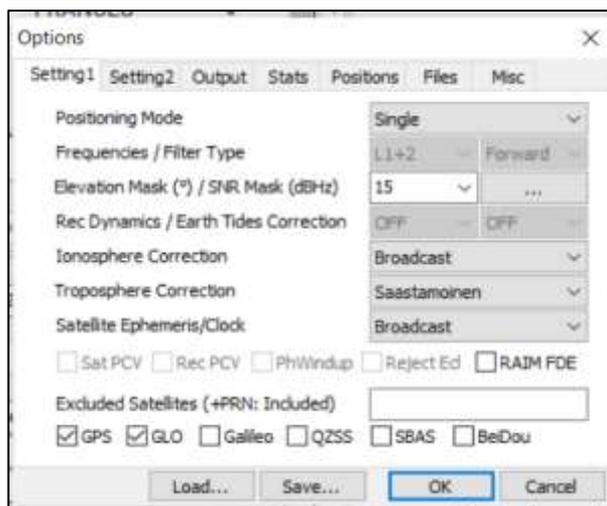


Ilustración 3-28: Ventana “Options” en RTKPOST
Realizado por: Bonilla E., 2023

3.7.3 RTKPLOT

Esta es una herramienta o una de las funciones que tiene RTKLIB para las soluciones de posicionamiento de gráficos RTKPOST y RTKNAVI. También es posible abrir la aplicación extrayendo archivos de puntos ya procesados. Esta herramienta, a su vez, muestra las señales de satélites registradas por los receptores, siendo las más comunes las señales de los sistemas GPS y GLONASS. Además, permite abrir 1 o 2 soluciones y trabajar con todos los archivos seleccionados que estén procesados.

Los puntos representados y procesados se pueden visualizar con Google Maps o Google Earth.

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para comprobar el funcionamiento de la antena choke ring low-cost se realizaron pruebas con diferentes antenas (monopolo, ublox y Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band). Además, se efectuaron diferentes trayectorias para analizar la precisión que aporta la antena choke ring low-cost a los procesadores de posicionamiento de los teléfonos celulares Xiaomi 11 Lite 5G y Motorola Moto G20 y finalmente se realizó una comparación entre los resultados de acuerdo con las antenas choke ring low-cost fabricadas con los materiales de aluminio y cobre.

4.1 Resultados de la Simulación

4.1.1 *Campo electromagnético*

Mediante el software de simulación de antenas se obtuvo la simulación del comportamiento del campo eléctrico en magnitud. Al colocar una antena transmisora por encima del diseño de la antena choke ring a una distancia de 180mm, se obtiene una concentración del campo en el lado donde se coloca la antena transmisora. La concentración e incidencia del campo eléctrico depende de la distancia a la que se encuentren las antenas además de su posición.

La Ilustración 4-1 muestra la simulación de campo eléctrico en magnitud sobre la antena choke ring con su escala de colores.

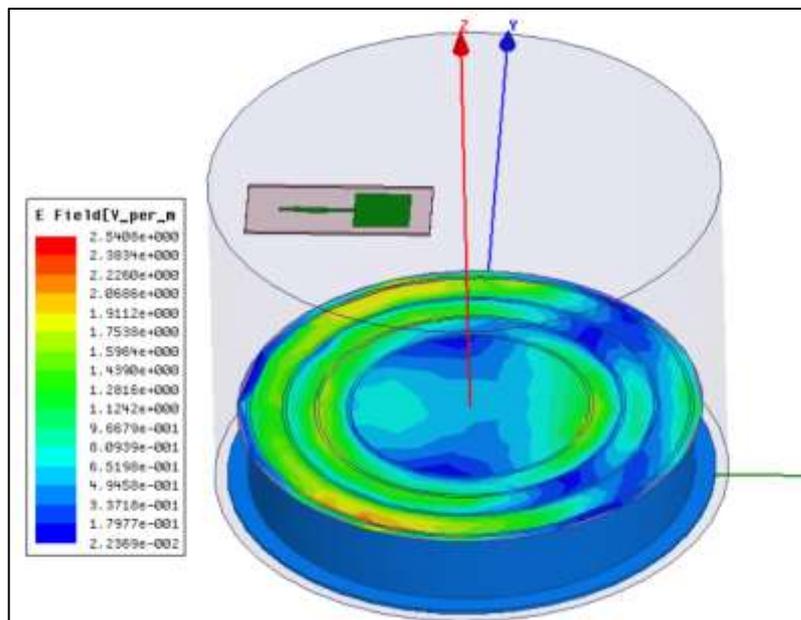


Ilustración 4-1: Campo eléctrico en magnitud

Realizado por: Bonilla E., 2023

De manera parecida se obtuvo la simulación del comportamiento del campo eléctrico de forma vectorial. Al colocar una antena transmisora por encima del diseño de la antena choke ring a una distancia de 180mm, los vectores indican que el campo sale de los anillos. De esta manera la antena choke ring actúa como un reflector.

La Ilustración 4-2 muestra la simulación de campo eléctrico en forma de vector sobre la antena choke ring con su escala de colores.

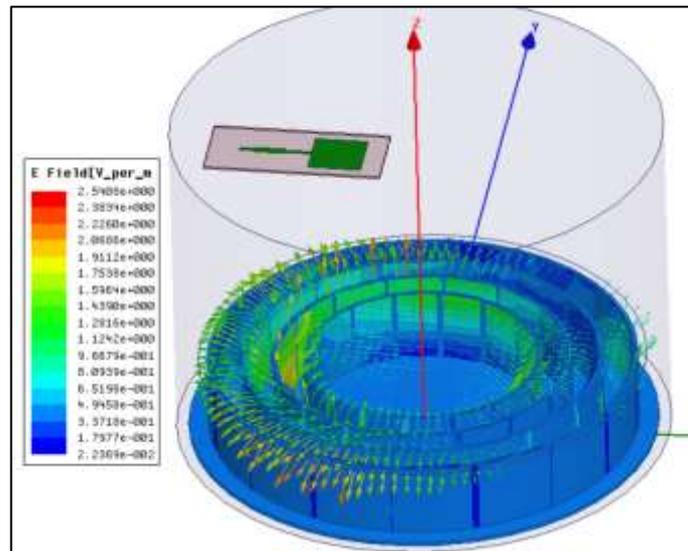


Ilustración 4-2: Campo eléctrico en forma vectorial
Realizado por: Bonilla E., 2023

Sin embargo, una parte del campo eléctrico también se concentra en el centro del diseño como se muestra en la Ilustración 4-3. Esta concentración puede variar de acuerdo con la distancia a la que se encuentren las antenas.

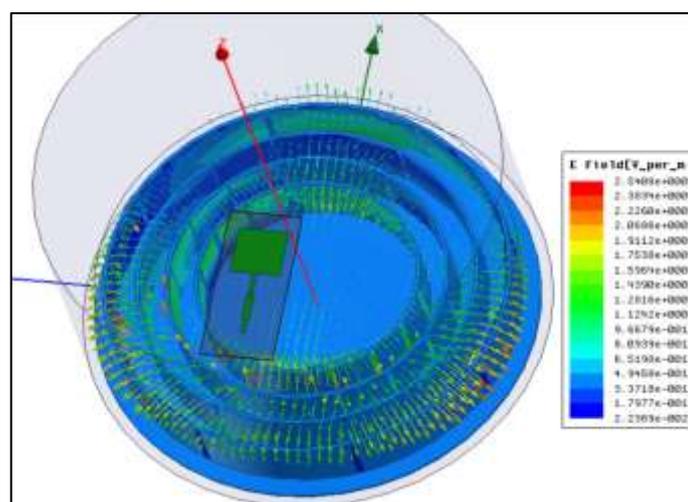


Ilustración 4-3: Campo eléctrico en forma vectorial – vista superior
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.1.2 Corriente superficial

En cuanto a la simulación de la corriente superficial en magnitud se obtuvo su comportamiento. Igualmente se colocó una antena transmisora por encima del diseño de la antena choke ring a una distancia de 180mm. Se obtiene una concentración de la corriente superficial en el centro del diseño de la antena choke ring.

La simulación de este parámetro se llevó a cabo en cada anillo del diseño. La Ilustración 4-4 muestra la simulación de la corriente superficial en magnitud sobre la antena choke ring con su escala de colores. Las Ilustraciones 4-5 y 4-6 muestra la simulación de la corriente superficial sobre los anillos donde hay mayor concentración.

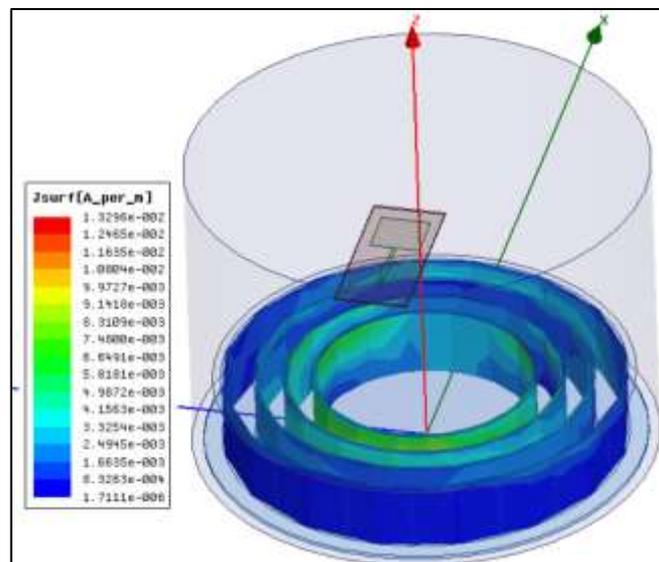


Ilustración 4-4: Corriente superficial en magnitud

Realizado por: Bonilla E., 2023

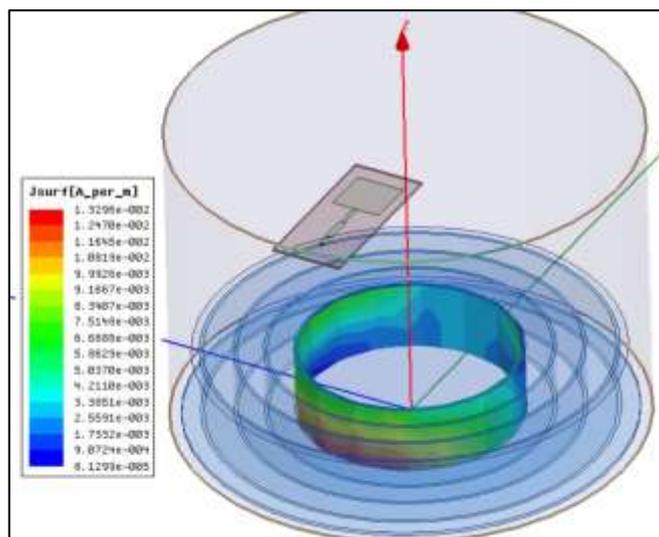


Ilustración 4-5: Corriente superficial en magnitud – Anillo 1

Realizado por: Bonilla E., 2023

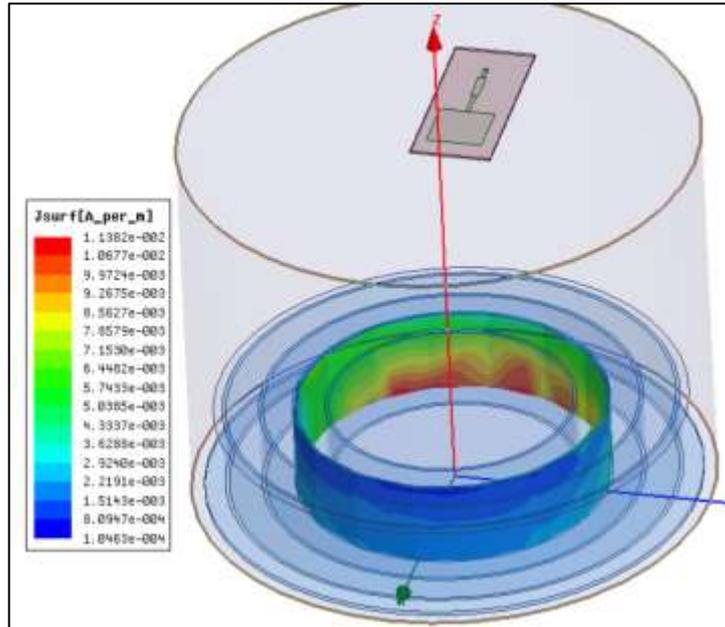


Ilustración 4-6: Corriente superficial en magnitud – Anillo 2
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.2 Análisis del coeficiente de reflexión

Mediante el software de simulación de antenas se obtuvo el parámetro de coeficiente de reflexión. Se colocaron las antenas transmisoras (L1 y L5) a una distancia de 180mm y las antenas receptoras de tipo monopolo en donde el plano de tierra fue la antena choke ring low-cost, por lo que se obtuvieron diferentes respuestas dependiendo de la posición del monopolo en cuanto a los anillos del diseño de la antena choke ring tanto en la simulación como en la implementación.

A continuación, se detallan los diferentes resultados dependiendo de la frecuencia de la antena monopolo y su posición.

4.2.1 Frecuencia L1

En la Ilustración 4-7 se muestran los escenarios de simulación donde se tiene una antena transmisora a la frecuencia L1 y una antena monopolo receptora a la misma frecuencia sobre el diseño de la antena choke ring, la cual se coloca encima de los diferentes anillos.

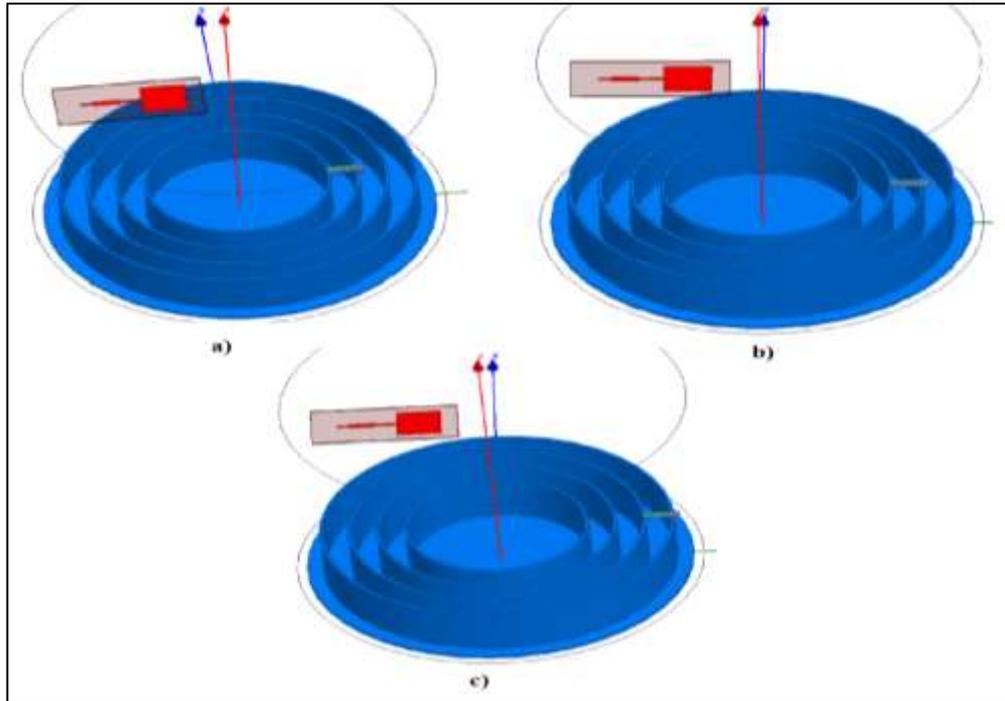


Ilustración 4-7: Ubicación antena monopolo L1 - a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-8 se muestran las respuestas del coeficiente de reflexión. Para el caso donde el monopolo está ubicado en el anillo 1 la frecuencia se encuentra centrada a L1 con -19.14 dB. Cuando el monopolo está ubicado en el anillo 2 la frecuencia se encuentra desplazada, existen dos puntos cercanos a la frecuencia L1 que son 1.39 GHz a -31.36 dB y 1.64 GHz a -45.33 dB y cuando el monopolo está ubicado en el anillo 3 la frecuencia se encuentra desplazada, existen dos puntos cercanos a la frecuencia L1 que son 1.48 GHz a -19.14 dB, 1.71 GHz a -22.19 dB.

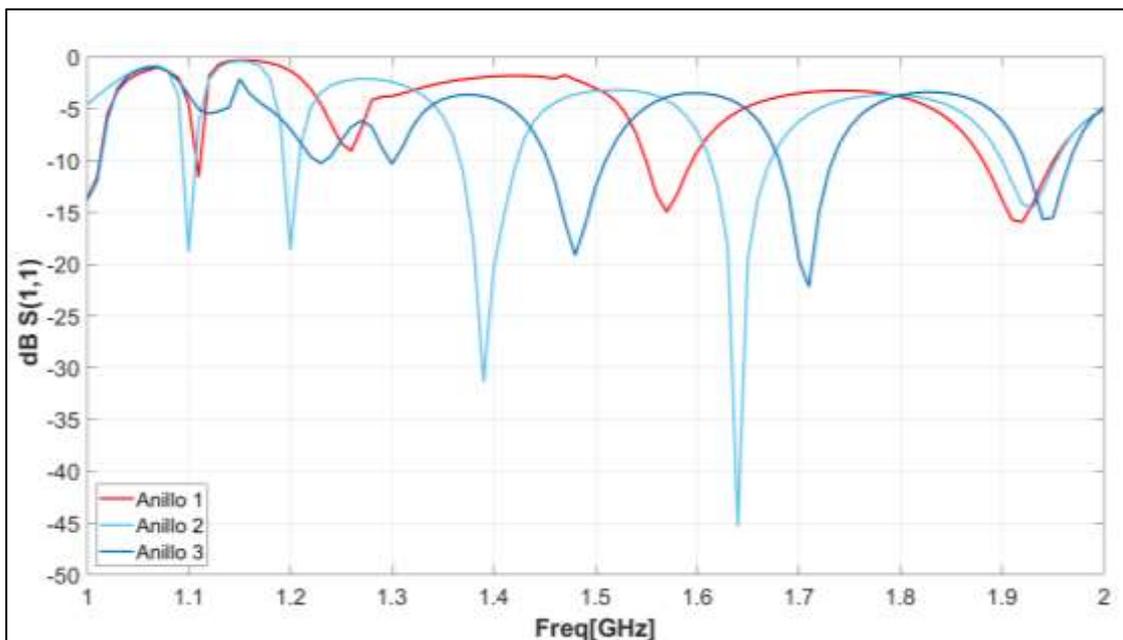


Ilustración 4-8: Parámetro S_{11} simulado a L1 según su ubicación
 Realizado por: Bonilla E., 2023

4.2.1.1 Antena choke ring low-cost con aluminio

El coeficiente de reflexión se comprobó con ayuda del Analizador de Redes Vectoriales (VNA, por sus siglas en inglés). Se establecieron los mismos escenarios con la implementación de la antena choke ring low-cost con PLA y papel aluminio. Este proceso se presenta en la Ilustración 4-9.

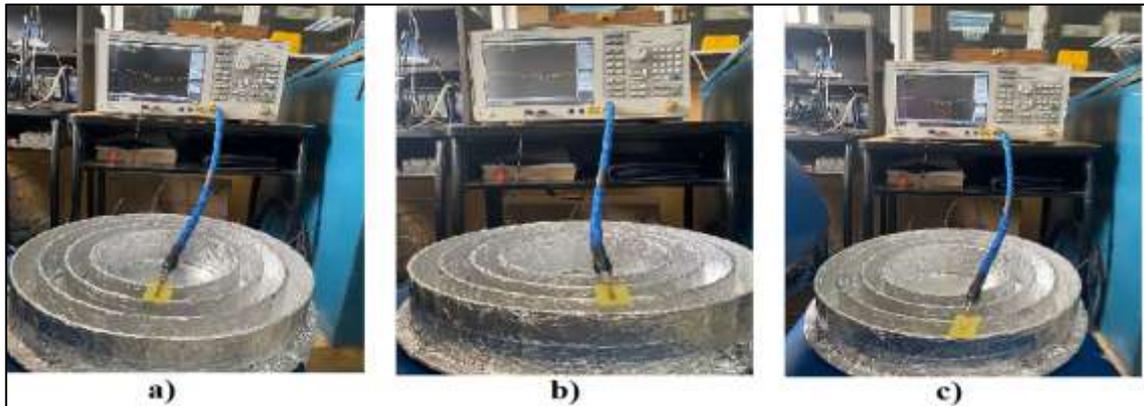


Ilustración 4-9: Monopolo a L1 plano de tierra con aluminio-a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-10 se muestran las respuestas del coeficiente de reflexión cuando se comprobó con el VNA. Para el caso a) donde el monopolo está ubicado en el anillo 1 la frecuencia se desplazó a 1.52 GHz a -22.75 dB. Para el caso b) donde el monopolo está ubicado en el anillo 2 las frecuencias se encuentran desplazadas, existen dos puntos cercanos que son 1.45 GHz a -9.33 dB y 1.78 GHz a -15.58 dB. Para el caso c) donde el monopolo está ubicado en el anillo 3 las frecuencias dominantes y cercanas son las de 1.54 GHz a -15.23 dB, 1.76 GHz a -18.97 dB.

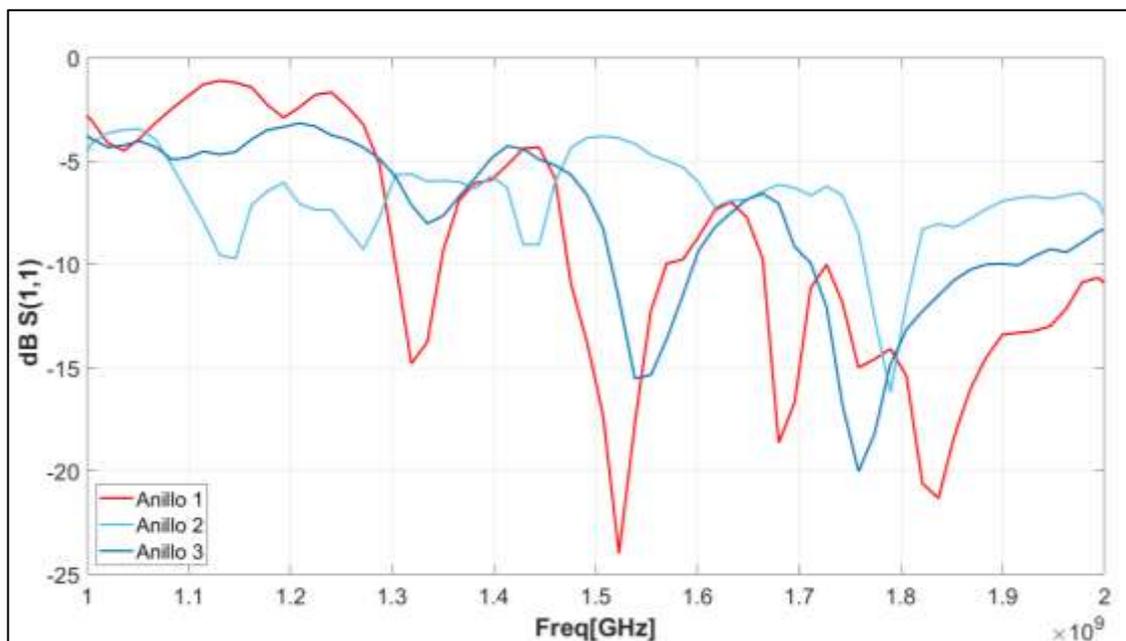


Ilustración 4-10: Parámetro S11-Plano de tierra con aluminio según su ubicación
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.2.1.2 Antena choke ring low-cost con cobre

El coeficiente de reflexión se comprobó igualmente con ayuda del VNA. Se establecieron los mismos escenarios con la implementación de la antena choke ring low-cost con PLA y cinta adhesiva de cobre. Este proceso se presenta en la Ilustración 4-11.

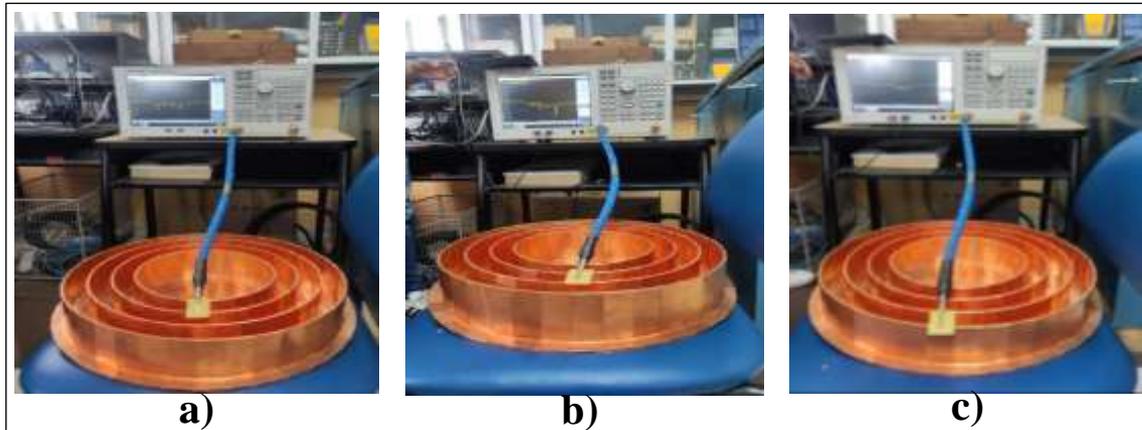


Ilustración 4-11: Monopolo a L1 plano de tierra con cobre - a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-12 se muestran las respuestas del coeficiente de reflexión cuando se comprobó con el VNA. Para el caso donde el monopolo está ubicado en el anillo 1 la frecuencia se desplazó a 1.54 GHz a -16.38 dB. Cuando el monopolo está ubicado en el anillo 2 las frecuencias se encuentran desplazadas, existen dos puntos cercanos que son 1.37 GHz a -21.78 dB y 1.62 GHz a -30.62 dB y para el caso donde el monopolo está ubicado en el anillo 3 las frecuencias dominantes y cercanas son las de 1.51 GHz a -11.38 dB, 1.71 GHz a -16.08 dB y 1.92 GHz a -20 dB.

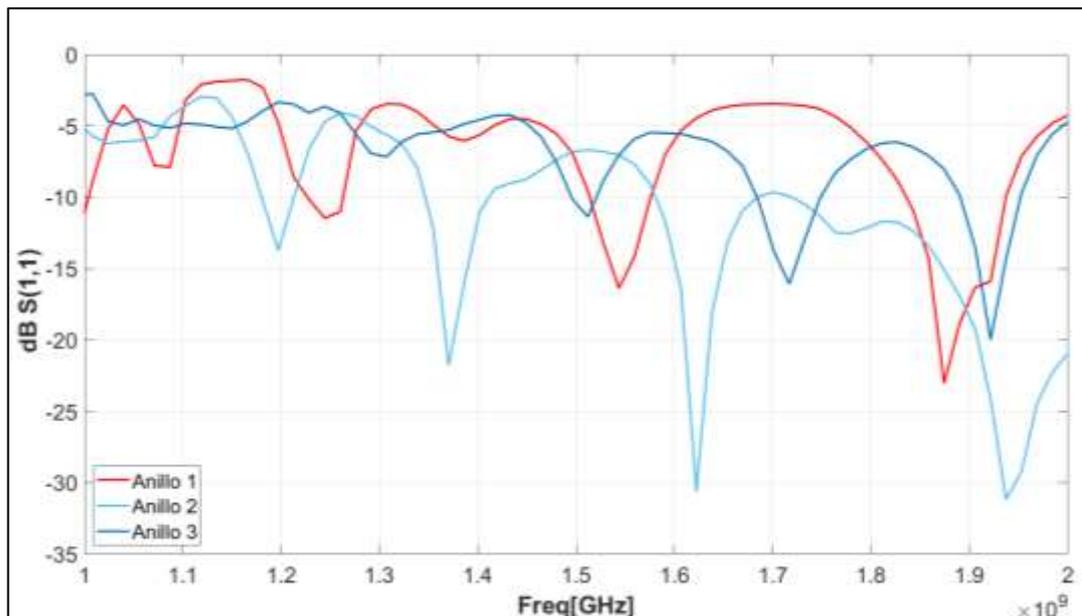


Ilustración 4-12: Parámetro S11 a L1 - Plano de tierra con cobre según su ubicación
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.2.2 Frecuencia L5

En la Ilustración 4-13 se muestran los escenarios de simulación donde se tiene una antena transmisora a la frecuencia L5 y una antena monopolo receptora a la misma frecuencia sobre el diseño de la antena choke ring, la cual se coloca encima de los diferentes anillos.

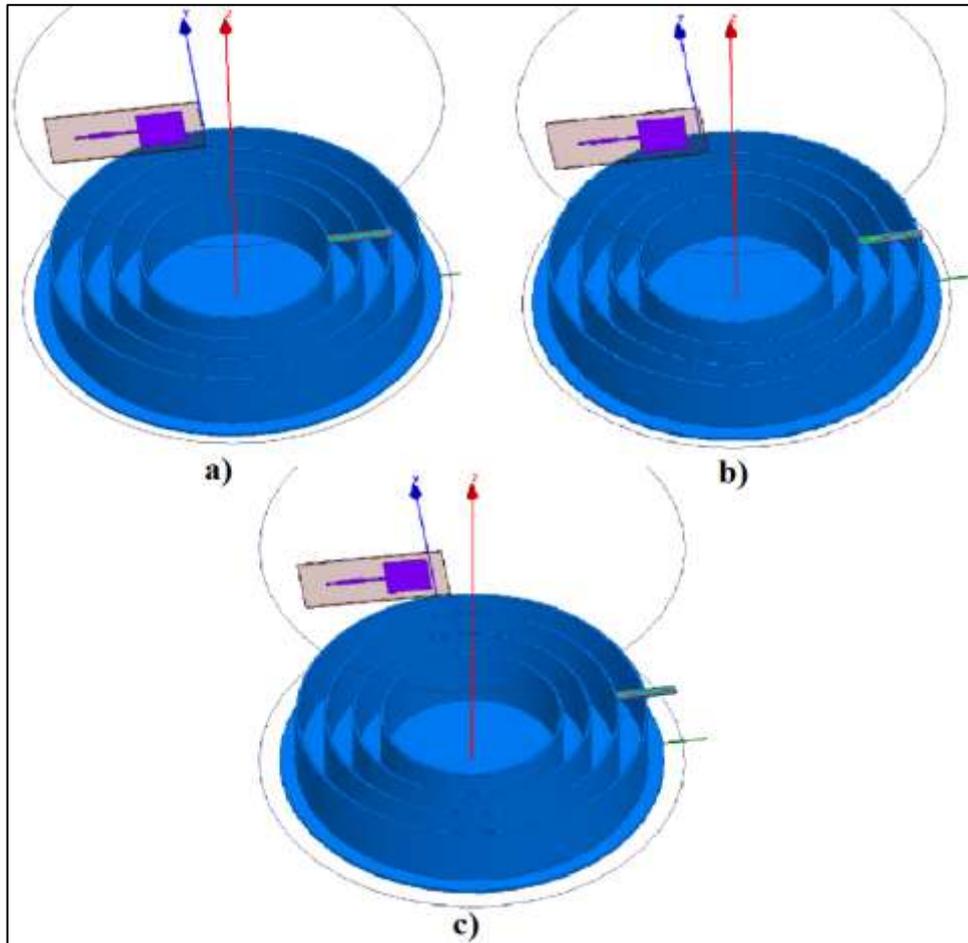


Ilustración 4-13: Ubicación del monopolo L5 – a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-14 se muestran las respuestas del coeficiente de reflexión. Para el caso a) donde el monopolo está ubicado en el anillo 1 la frecuencia se encuentra centrada a L5 con -10.6 dB. Para el caso b) donde el monopolo está ubicado en el anillo 2 la frecuencia se encuentra desplazada, existen dos puntos cercanos que son 1.19 GHz a -14.78 dB y 1.36 a -12.48 dB. Para el caso c) donde el monopolo está ubicado en el anillo 3 la frecuencia se encuentra desplazada, existen un punto cercano a la frecuencia L5 que es 1.20 GHz a -7.89 dB.

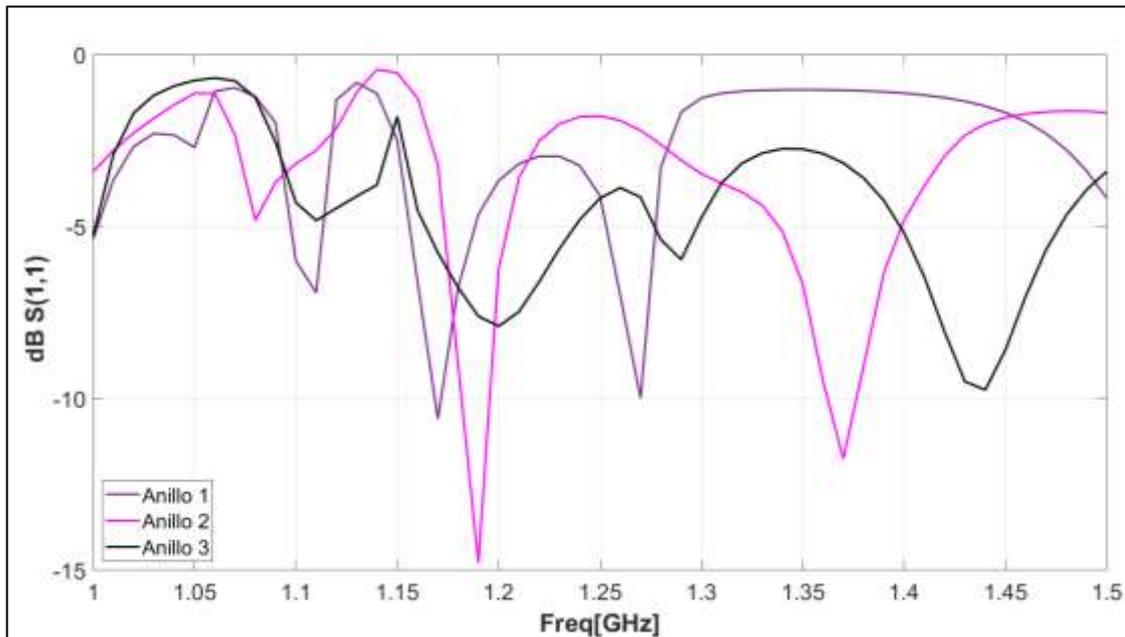


Ilustración 4-14: Parámetro S11 a L5 simulado en las diferentes ubicaciones
 Realizado por: Bonilla E., 2023

4.2.2.1 Antena choke ring low-cost con aluminio

El parámetro del coeficiente de reflexión se comprobó igualmente con ayuda del Analizador de Redes Vectoriales (VNA). Se establecieron los mismos escenarios que se hicieron con la frecuencia L1 y con la implementación de la antena choke ring low-cost con PLA y papel aluminio. Este proceso se presenta en la Ilustración 15-4.

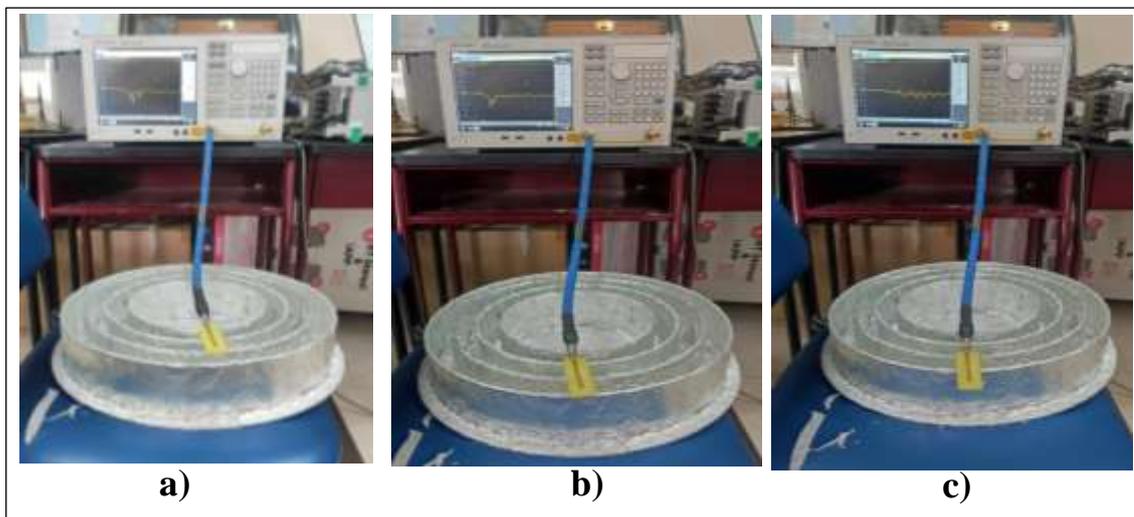


Ilustración 4-15: Monopolo L5 plano de tierra con aluminio-a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-16 se muestran las respuestas del coeficiente de reflexión cuando se comprobó con el VNA. Para el caso donde el monopolo está ubicado en el anillo 1 la frecuencia se desplazó a 1.18 GHz a -12.33 dB. En cambio, cuando el monopolo está ubicado en el anillo 2 las frecuencias se encuentran desplazadas, existen dos puntos cercanos que son 1.12 GHz a -9.36 dB

y 1.23 GHz a -10.70 dB y cuando donde el monopolo está ubicado en el anillo 3 las frecuencias dominantes y cercanas son las de 1.20 GHz a -6.07 dB y 1.27 GHz a -5.56 dB.

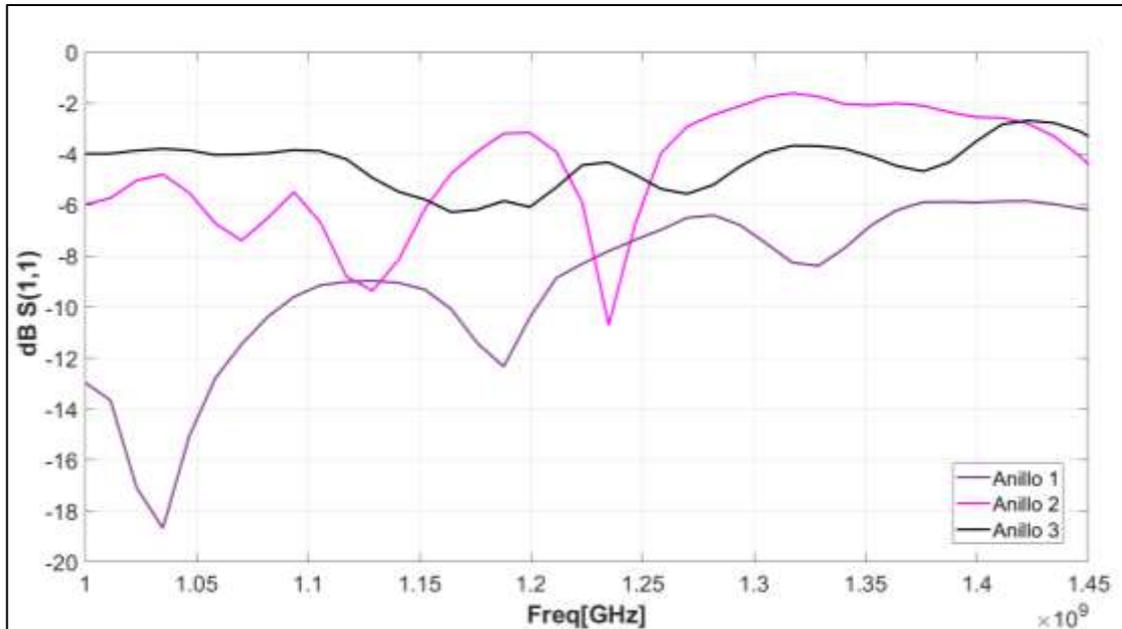


Ilustración 4-16: Parámetro S11 a L5 - Plano de tierra con aluminio según la ubicación
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.2.2.2 Antena choke ring low-cost con cobre

El parámetro del coeficiente de reflexión se comprobó con el VNA. Se establecieron los mismos escenarios que se hicieron con la frecuencia L1 y con la implementación de la antena choke ring low-cost con PLA y cinta adhesiva de cobre. Este proceso se presenta en la Ilustración 4-17.

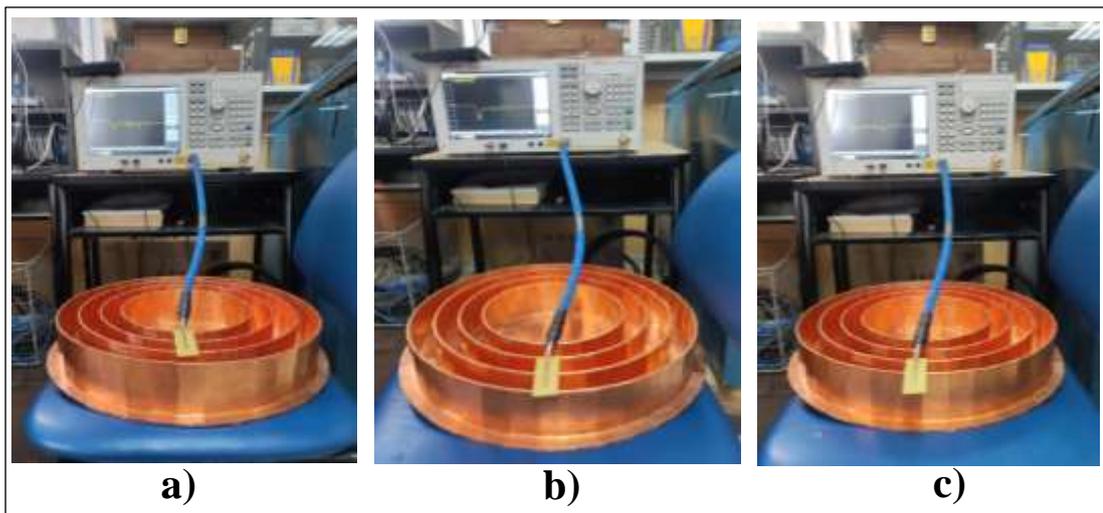


Ilustración 4-17: Monopolo a L5- plano de tierra con cobre a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-18 se muestran las respuestas del coeficiente de reflexión cuando se comprobó con el VNA. Para el caso donde el monopolo está ubicado en el anillo 1 la frecuencia está a L5

en 1.17 GHz a -18.44 dB. Cuando el monopolo está ubicado en el anillo 2 las frecuencias se encuentran desplazadas, existen dos puntos cercanos que son 1.14 GHz a -11.98 dB y 1.32 GHz a -14.40 dB. En cambio, cuando el monopolo está ubicado en el anillo 3 existen dos frecuencias cercanas que son 1.16 GHz a -10.69 dB y 1.25 GHz a -8.93 dB.

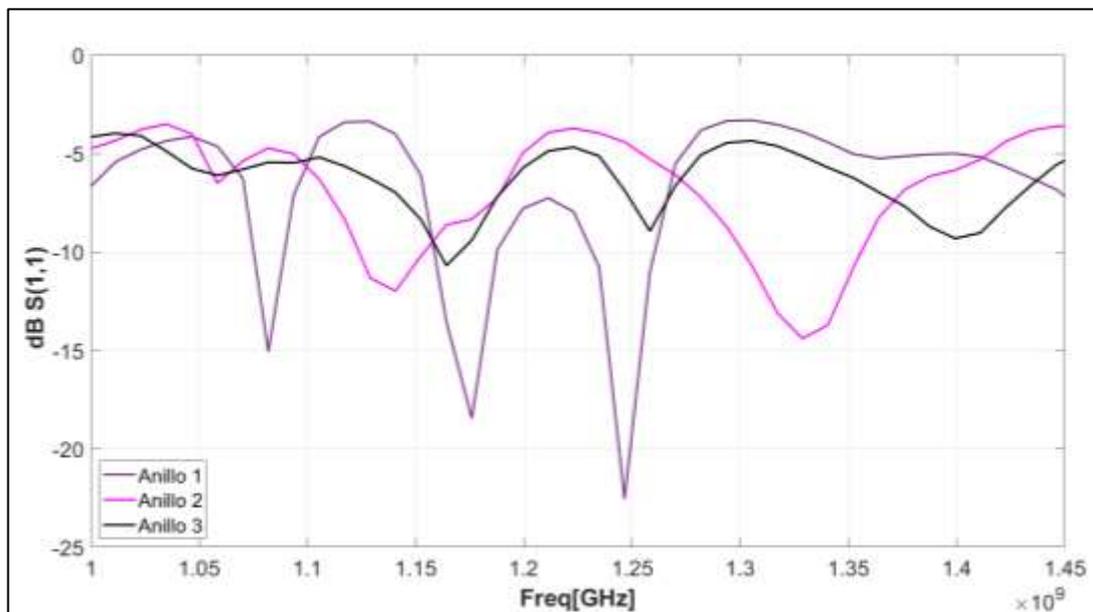


Ilustración 4-18: Parámetro S11 a L5 - Plano de tierra con cobre según la ubicación
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3 Obtención de patrones de radiación

Para esta etapa primero se obtuvo el patrón de radiación de las antenas monopolo a las frecuencias de la banda L de GPS. Después se obtuvo el patrón de radiación de estas, pero bajo la influencia de la antena choke ring-low cost implementada con papel aluminio.

En los dos casos se colocaron las antenas transmisoras a una distancia de 20 cm de las antenas receptoras de tipo monopolo. En el caso donde se encuentran situadas por encima de la antena choke ring low-cost sus resultados varían dependiendo de la posición del monopolo en cuanto a los anillos del diseño de la antena choke ring.

Para la obtención de los patrones de radiación se utilizó el equipo generador de señales y el analizador de espectros.

A continuación, se detallan los diferentes resultados dependiendo de la frecuencia de la antena monopolo y su posición.

4.3.1 Antena Monopolo L1

En la Ilustración 4-19 se muestra el patrón de radiación de la antena monopolo a la frecuencia L1 (Ganancia normalizada).

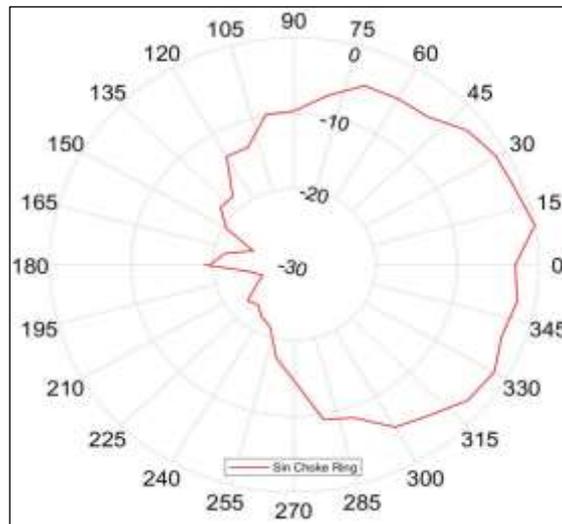


Ilustración 4-19: Patrón de radiación Monopolo a L1

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-20 se muestra el escenario de medición del patrón de radiación para el monopolo a la frecuencia L1.



Ilustración 4-20: Escenario - patrón de radiación monopolo L1 a) Aluminio b) Cinta de cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.1.1 Antena choke ring low-cost con aluminio

En la Ilustración 4-21 se muestran los patrones de radiación (Ganancia normalizada) obtenidos dependiendo de la posición del monopolo sobre la antena choke ring low-cost con aluminio. En comparación con el patrón de radiación de la antena monopolo sin influencia de la antena choke ring low-cost. Estos patrones son más directivos. En el caso a) y c) la potencia aumenta mientras que en el caso b) la potencia se mantiene.

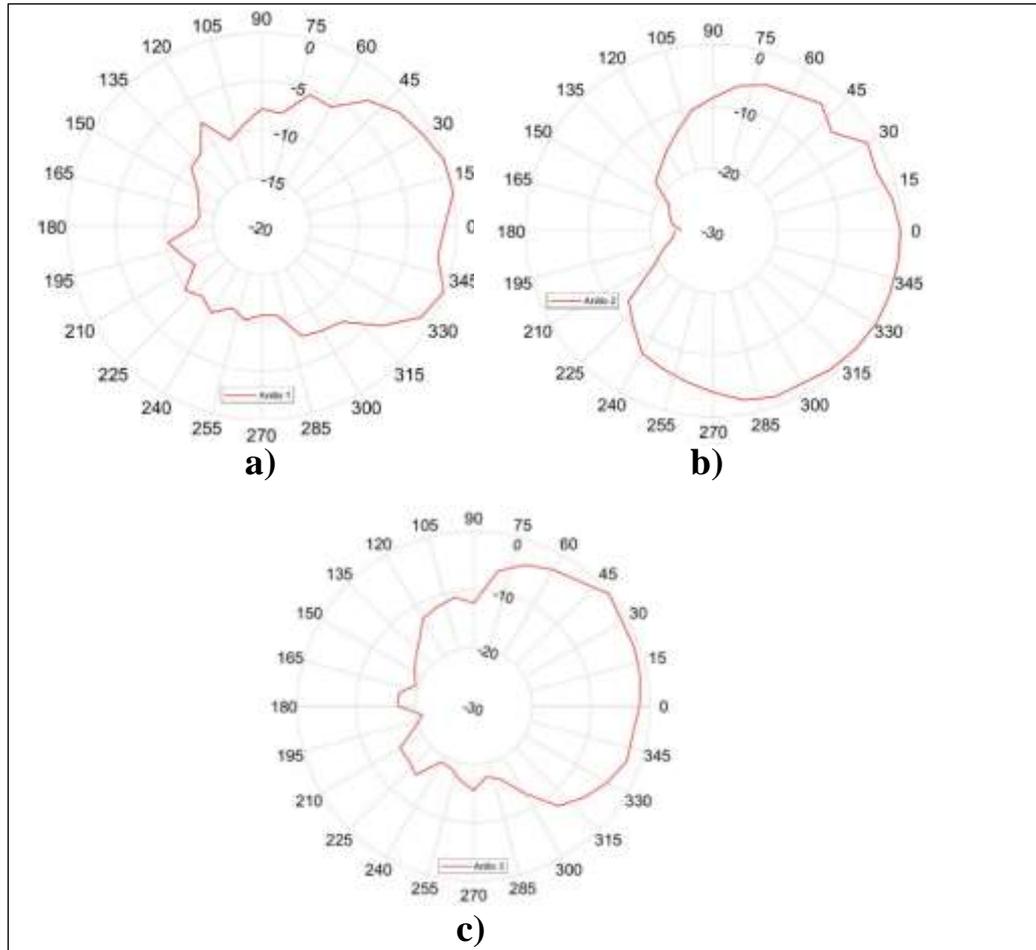


Ilustración 4-21: Monopolo L1 plano de tierra con aluminio–a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3

Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.1.2 Antena choke ring low-cost con cobre

En la Ilustración 4-22 se muestran los patrones de radiación (Ganancia normalizada) obtenidos dependiendo de la posición del monopolo sobre la antena choke ring low-cost recubierta con cobre. En comparación con el patrón de radiación de la antena monopolo sin influencia de la antena choke ring low-cost. Estos patrones son más directivos y los lóbulos posteriores se reducen. En el caso b) y c) la potencia aumenta ya que es cercana a cero mientras que en el caso a) la potencia se mantiene, pero se tiene un pico cercano a cero.

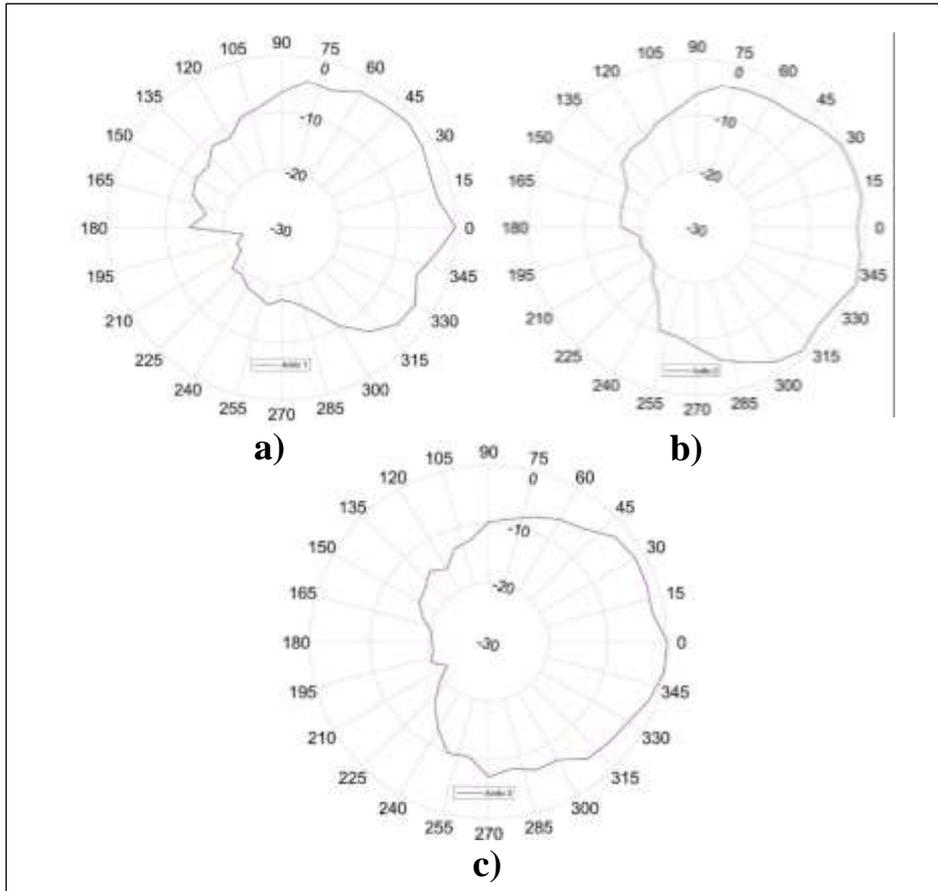


Ilustración 4-22: Monopolo L1 plano de tierra con cobre a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
 Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.2 Antena Monopolo L5

En la Ilustración 4-23 se muestra el patrón de radiación de la antena monopolo a la frecuencia L5 (Ganancia normalizada).

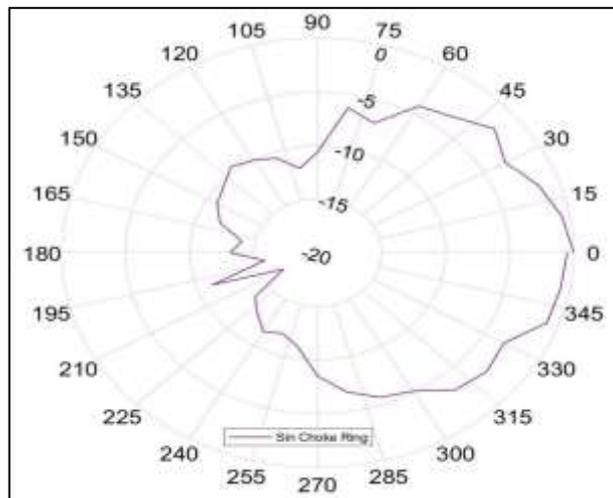


Ilustración 4-23: Patrón de radiación Monopolo L5
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-24 se muestra el escenario de medición del patrón de radiación para el monopolo a la frecuencia L5.



Ilustración 4-24: Escenario – patrón de radiación monopolo a L5- a) aluminio b) cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.2.1 Antena choke ring low-cost con aluminio

En la Ilustración 4-25 se muestran los patrones de radiación (Ganancia normalizada) obtenidos dependiendo de la posición del monopolo sobre la antena choke ring low-cost con aluminio. En comparación con el patrón de radiación de la antena monopolo sin influencia de la antena choke ring low-cost. Estos patrones son más directivos. En los tres casos la potencia se mantiene.

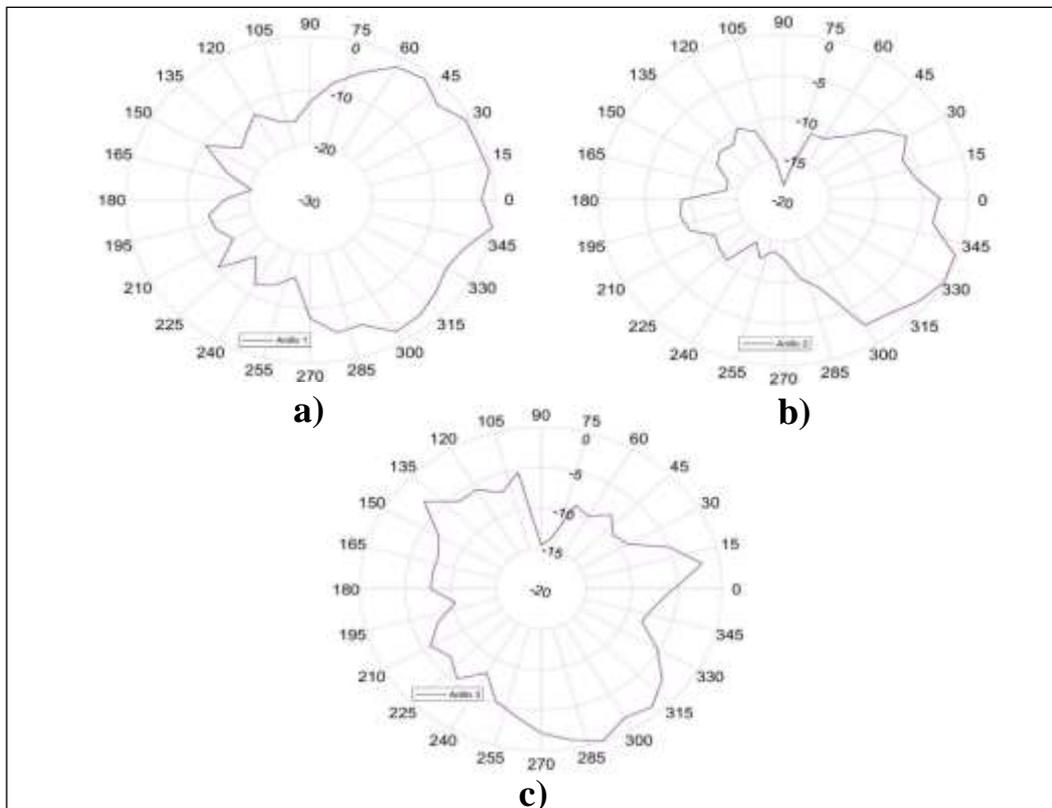


Ilustración 4-25: Monopolo L5 - plano de tierra con aluminio – a) Anillo 1 b) Anillo 2
c) Anillo 3
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.2.2 Antena choke ring low-cost con cobre

En la Ilustración 4-26 se muestran los patrones de radiación (Ganancia normalizada) obtenidos dependiendo de la posición del monopolo sobre la antena choke ring low-cost con aluminio. En comparación con el patrón de radiación de la antena monopolo sin influencia de la antena choke ring low-cost con cobre. Estos patrones son más directivos. En los casos b) y c) los lóbulos posteriores se reducen, pero en el caso a) los lóbulos secundarios no se atenúan por completo. En el caso de la potencia, para el apartado a) se tiene un pico cercano a cero y en los apartados b) y c) se tiene una mejora de la potencia ya que sus lóbulos principales están cercanos al valor cero.

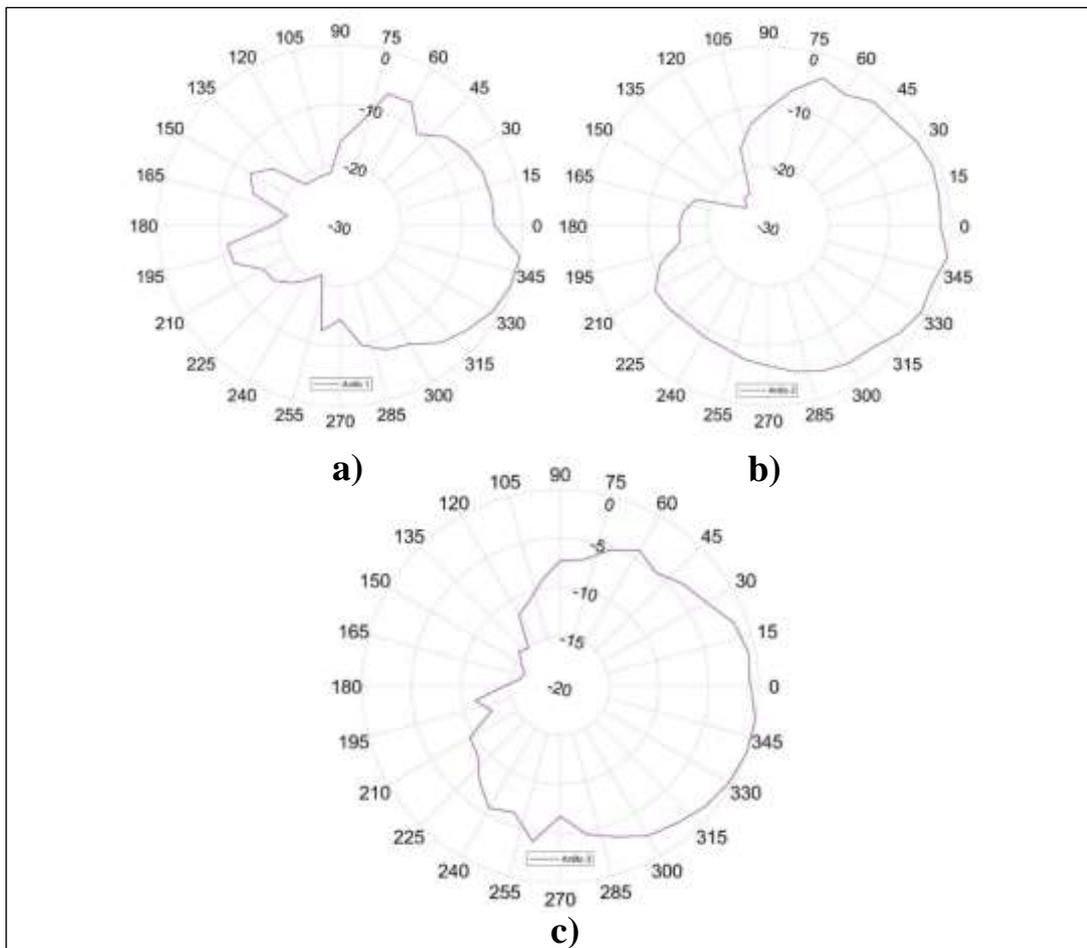


Ilustración 4-26: Monopolo L5-plano de tierra con cobre–a) Anillo 1 b) Anillo 2 c) Anillo 3
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.3 Antena U-blox Serie ANN-MB

En la Ilustración 4-27 se muestra el escenario de medición del patrón de radiación para la antena U-blox a la frecuencia L1.

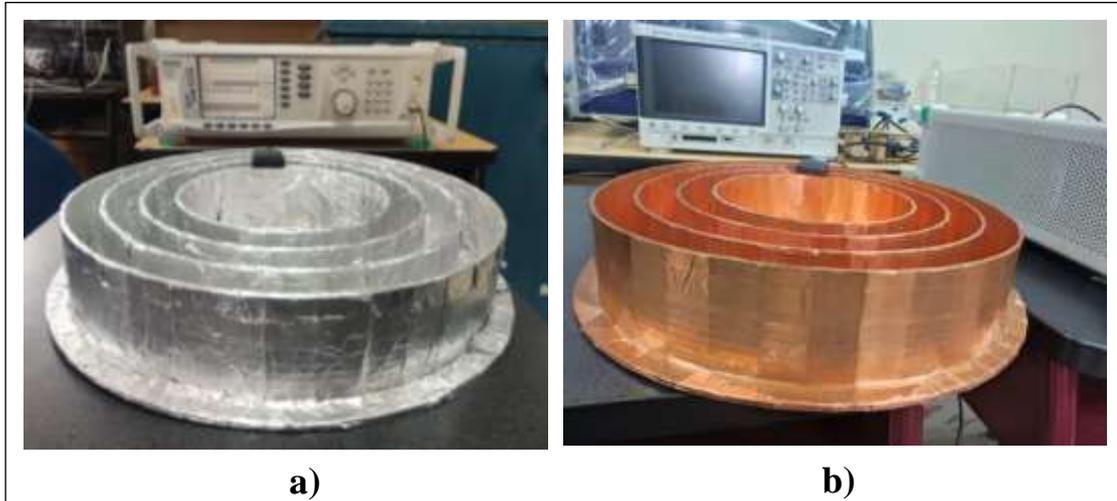


Ilustración 4-27: Escenario patrón de radiación – antena U-blox
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-28 a) se muestra el patrón de radiación de la antena U-blox Serie ANN-MB a la frecuencia L1, mientras que en b) se muestra el diagrama de radiación obtenido sobre la antena choke ring low-cost con aluminio (Ganancia normalizada) y en c) se muestra el diagrama de radiación sobre la antena choke ring low-cost con cinta adhesiva de cobre (Ganancia normalizada). En comparación con el patrón de radiación de la antena U-blox sin influencia de la antena choke ring low-cost, estos patrones mantienen una potencia estable en más puntos, e igualmente son directivos.

El patrón de radiación con la antena choke ring low-cost con cinta adhesiva de cobre presenta una mejora en sus lóbulos posteriores respecto a la antena choke ring low-cost con aluminio. Respecto a la potencia se tienen puntos más cercanos al valor de cero.

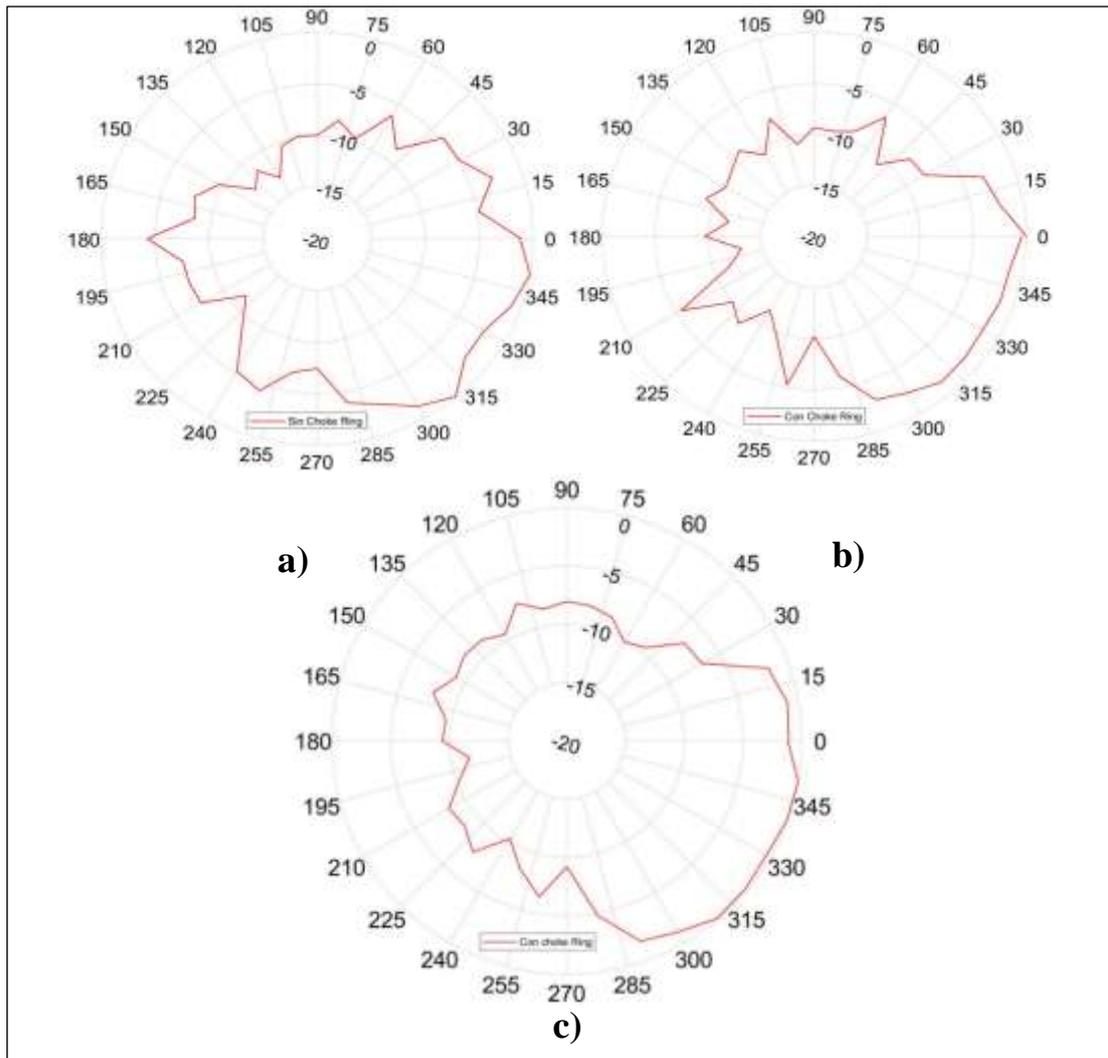


Ilustración 4-28: Patrón de radiación a) Antena U-blox b) Choke ring aluminio c) Choke ring cobre

Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.4 Antena Calibrated Survey GNSS Tripleband + L-band

4.3.4.1 Frecuencia L1

En la Ilustración 4-29 se muestra el escenario de medición del patrón de radiación para la antena de triple banda.

En la Ilustración 4-30 se muestra el diagrama de radiación (Ganancia normalizada) obtenido de la antena de triple banda sobre la antena choke ring low-cost. En comparación con el patrón de radiación de la antena sin la influencia de la antena choke ring low-cost. Este patrón mantiene una potencia estable en más puntos.



Ilustración 4-29: Escenario patrón de radiación – antena triple banda
Realizado por: Bonilla E., 2023

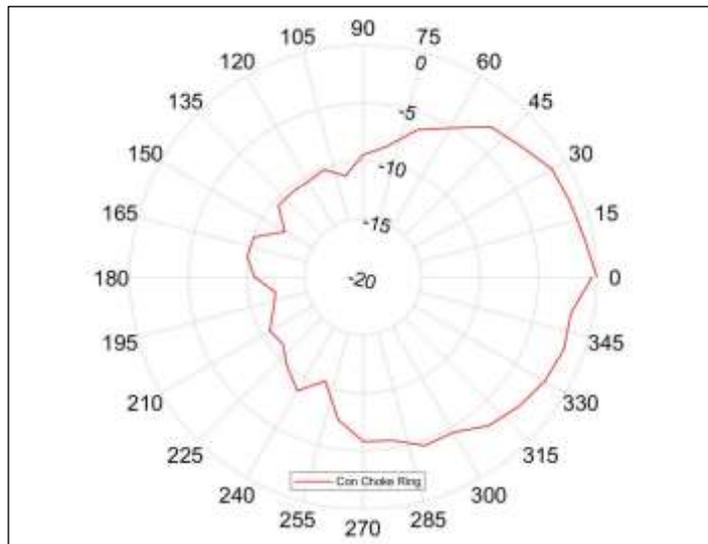


Ilustración 4-30: Patrón de radiación antena de triple banda a L1 con Choke Ring Low-Cost
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.3.4.2 Frecuencia L5

En la Ilustración 4-31 se muestra el diagrama de radiación (Ganancia normalizada) obtenido de la antena de triple banda sobre la antena choke ring low-cost. En comparación con el patrón de radiación de la antena sin la influencia de la antena choke ring low-cost. Este patrón mantiene una potencia estable en más puntos.

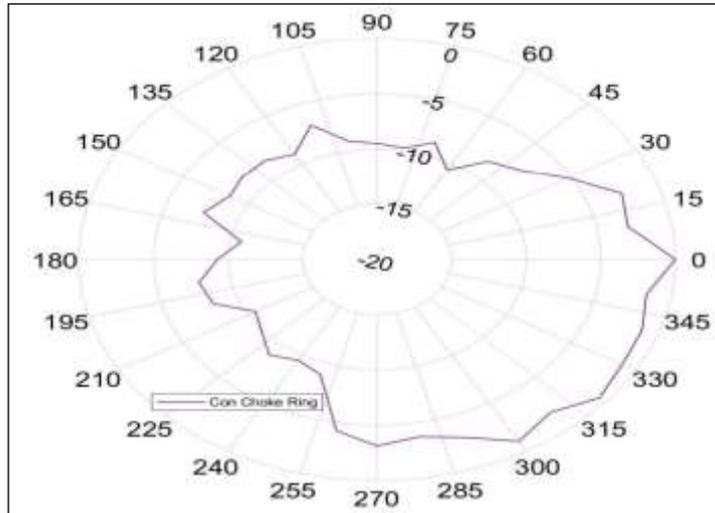


Ilustración 4-31: Patrón de radiación antena de triple banda a L5 con Choke Ring Low-Cost
 Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4 Mediciones en ambientes con multipath

Para comprobar el funcionamiento de la antena choke ring low-cost se realizaron pruebas de trayectoria y estáticas con los celulares, Motorola Moto G20 y Xiaomi 11 Lite 5G como receptores de datos GNSS a través de la aplicación móvil Geo++ RINEX Logger.

Luego las observaciones de los datos se procesaron con la ayuda del software RTKLIB para obtener las gráficas de precisión respecto al eje x, y, z.

Posteriormente se realizó un análisis estadístico del eje z (alturas) para estudiar la variación que existe dependiendo los escenarios de medición, a la vez que también se realizó el cálculo del RMSE y los gráficos de bigotes para obtener un análisis gráfico.

4.4.1 Trayectorias

A continuación, se muestra el escenario y los resultados de las mediciones de posicionamiento realizadas en los meses de mayo y junio de 2023 con los planos de tierra con aluminio y cobre.

4.4.1.1 Escenario

Todas las pruebas para la toma de datos GNSS se realizaron durante el mes de mayo y junio de 2023. El recorrido que se realizó fue alrededor de la Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería en Sistemas, Edificio central y el parque del estudiante de la ESPOCH. Estas pruebas se realizaron con grabaciones de aproximadamente 20 minutos en modo kinematic con Geo++ RINEX Logger, la aplicación toma una muestra cada 1 segundo.

La Ilustración 4-32 muestra el recorrido realizado durante todas las pruebas. Este recorrido se obtuvo a partir de puntos específicos tomados con una antena de precisión GPS para obtener posteriormente el perfil topográfico del recorrido. En total la distancia recorrida fue de 533.47m.



Ilustración 4-32: Trayectoria realizada durante todas las pruebas.
Realizado por: Bonilla E., 2023

Para obtener el perfil topográfico se utilizó una antena GPS de precisión para tomar las coordenadas en puntos específicos del recorrido. En la Ilustración 4-33 se observa el kit de Polaris que se utilizó durante la recolección de coordenadas.



Ilustración 4-33: Kit de antena GNSS Polaris
Fuente: <https://www.polaris-gnss.com/blog>

En la Ilustración 4-34 se puede observar el perfil del recorrido que se siguió, en total se recorrieron 533.47 m.

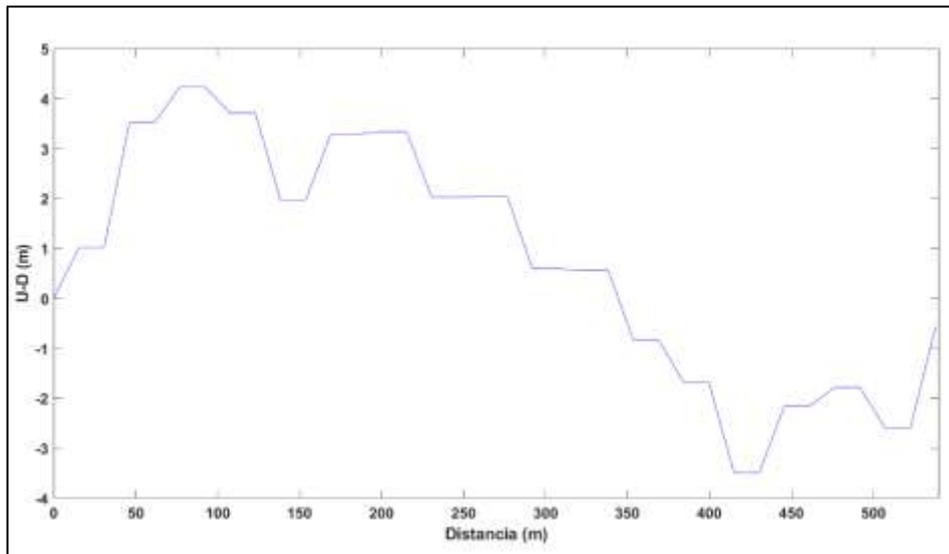


Ilustración 4-34: Perfil del terreno recorrido
 Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4.1.2 Post procesamiento de datos

La primera medición se realizó con el celular Moto G20 y sin la influencia de la antena choke ring low-cost, con el celular en modo avión, únicamente teniendo encendido la opción de GPS. La Ilustración 4-35 muestra los puntos recogidos durante la trayectoria.



Ilustración 4-35: Trayectoria – Moto G20
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-36 se muestran los datos procesados de la trayectoria en RTKLIB. En las siguientes gráficas se muestran las posiciones calculadas, la gráfica a) representa el eje x (East-West) o Longitud, en la gráfica b) se representa el eje y (North-South) o Latitud. Es decir, se muestra la trayectoria desde las respectivas perspectivas.

La gráfica c) representa el eje z (Up-Down) o Altura donde también se observa la variación de los errores respecto a la altura a lo largo del tiempo ocasionados por el efecto multitrayecto.

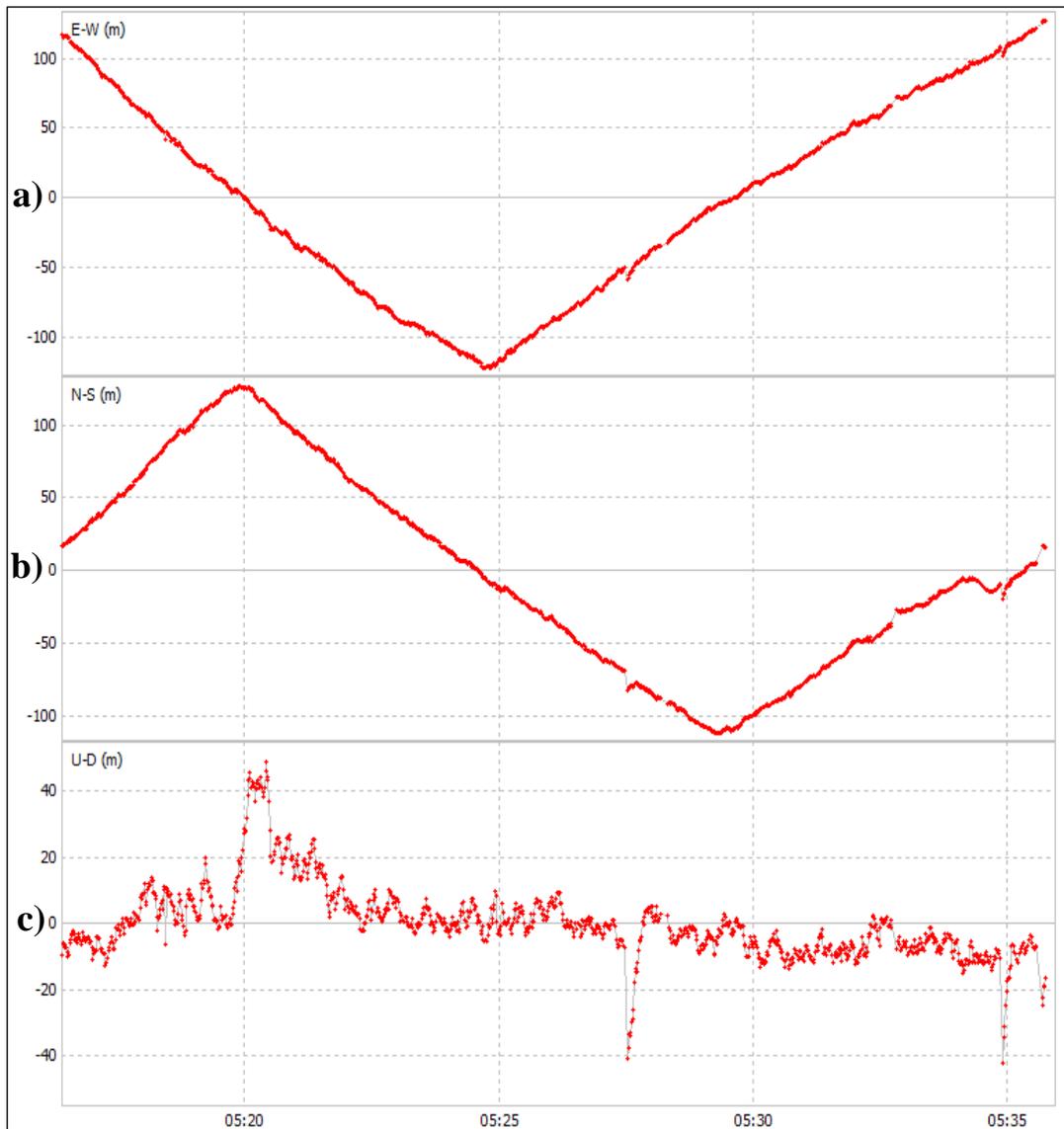


Ilustración 4-36: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Moto G20 en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-37 se muestran los datos procesados de la trayectoria realizada con el celular Moto G20 y la antena choke ring low-cost con aluminio.

En la Ilustración 4-38 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.

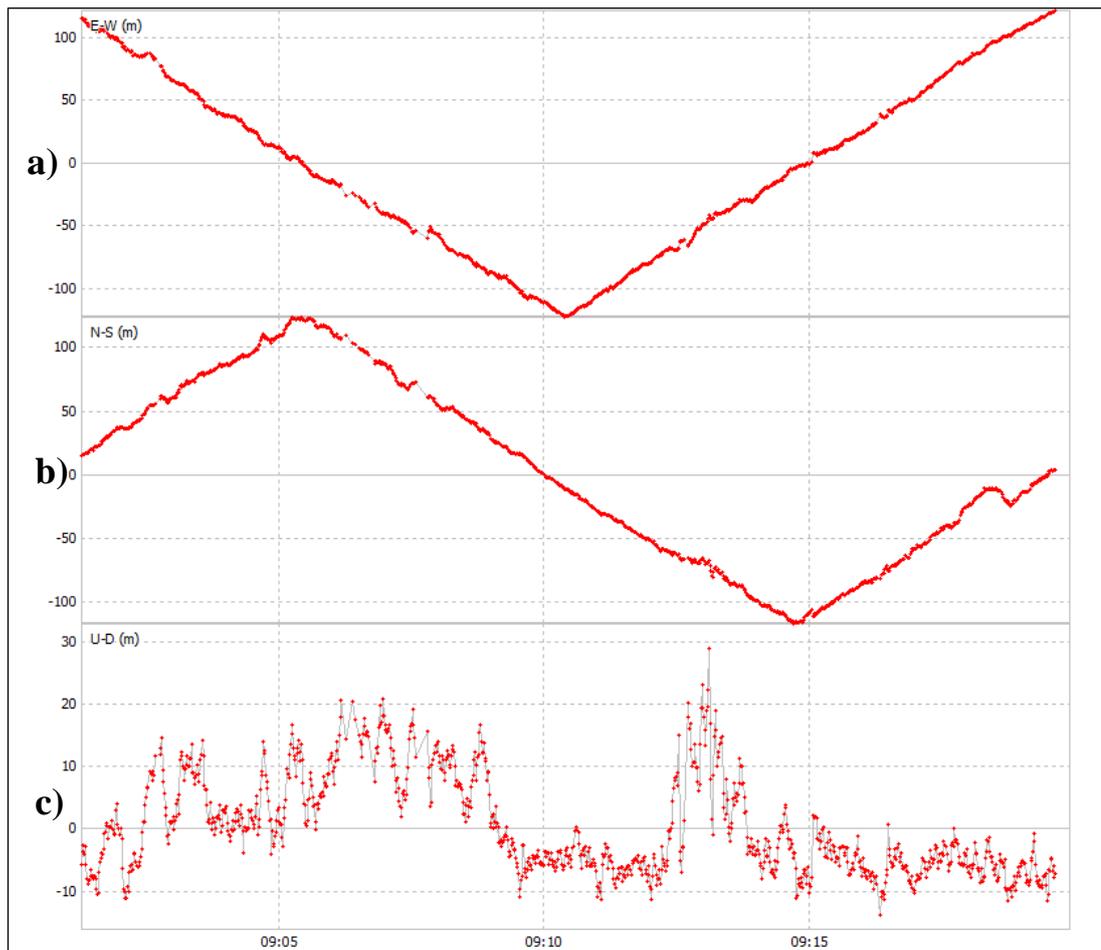


Ilustración 4-37: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

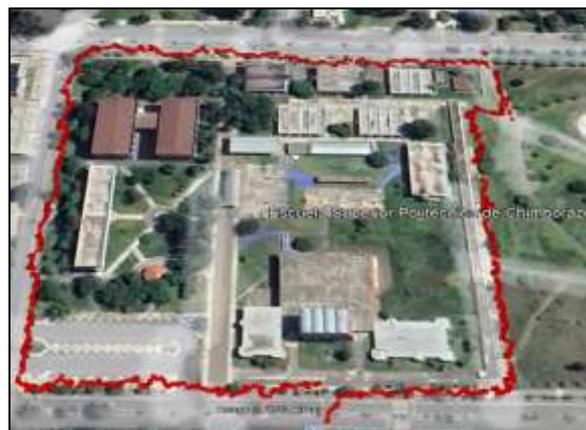


Ilustración 4-38: Trayectoria–Moto G20–Choke Ring low-cost con aluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4- 39 se muestran los datos procesados de la trayectoria realizada con el celular Moto G20 y la antena choke ring low-cost con cobre.

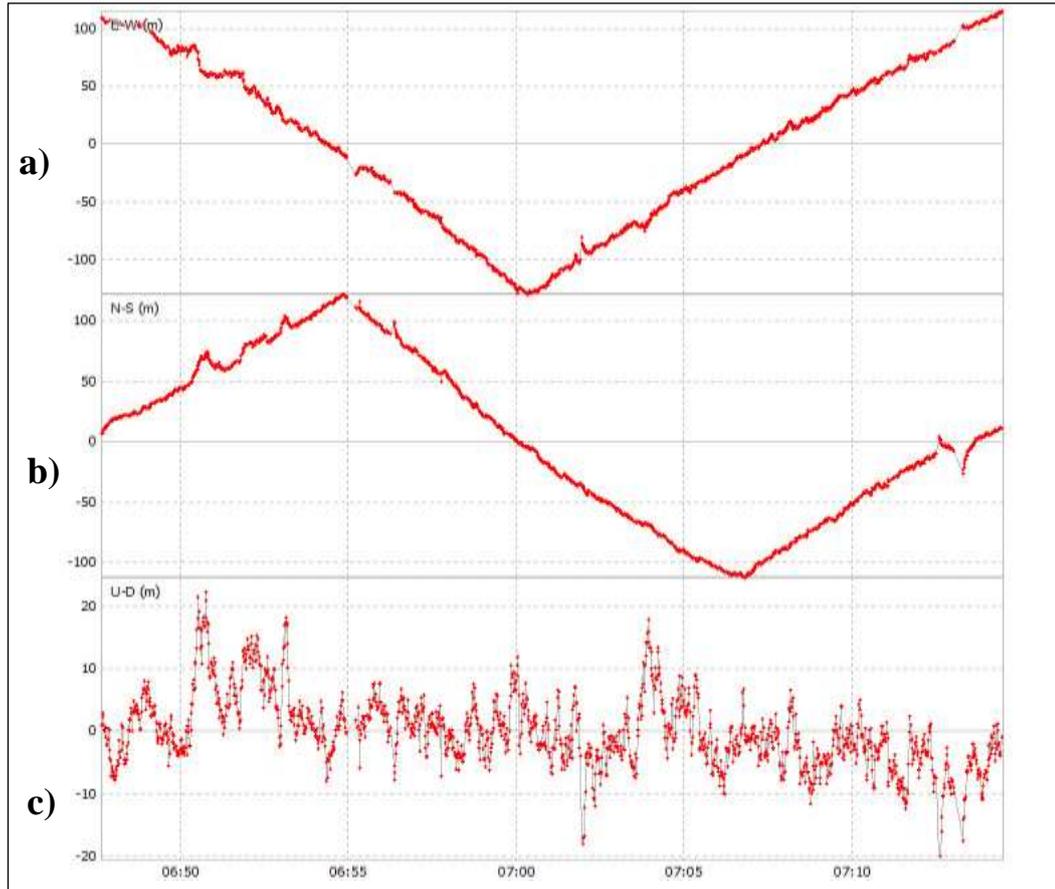


Ilustración 4-39: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-40 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.



Ilustración 4-40: Trayectoria–Moto G20-Choke Ring low-cost con cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

La siguiente medición se realizó sin la antena choke ring low-cost y con el celular Xiaomi 11 Lite 5G en modo avión y la opción de GPS activada. La Ilustración 4-41 muestra los puntos recogidos durante la trayectoria.



Ilustración 4-41: Trayectoria – Xiaomi 11 Lite 5G
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-42 se muestran los datos procesados. En las gráficas se muestran las posiciones calculadas, en a) y en b) se observa la trayectoria desde las diferentes perspectivas (East-West y North-South) y la gráfica c) Up-Down donde se muestra la variación de la altura por causa del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo.

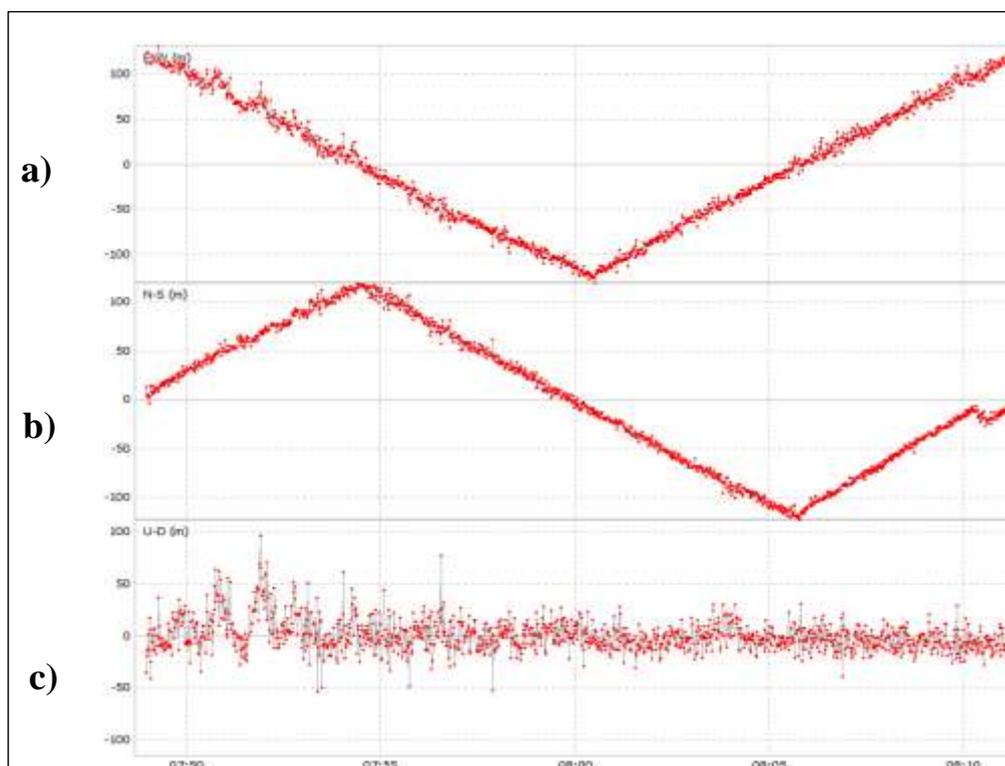


Ilustración 4-42: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Xiaomi 11 Lite 5G sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-43 se observan los datos procesados de la trayectoria realizada con el celular Xiaomi 11 Lite 5G y la antena choke ring low-cost con aluminio.

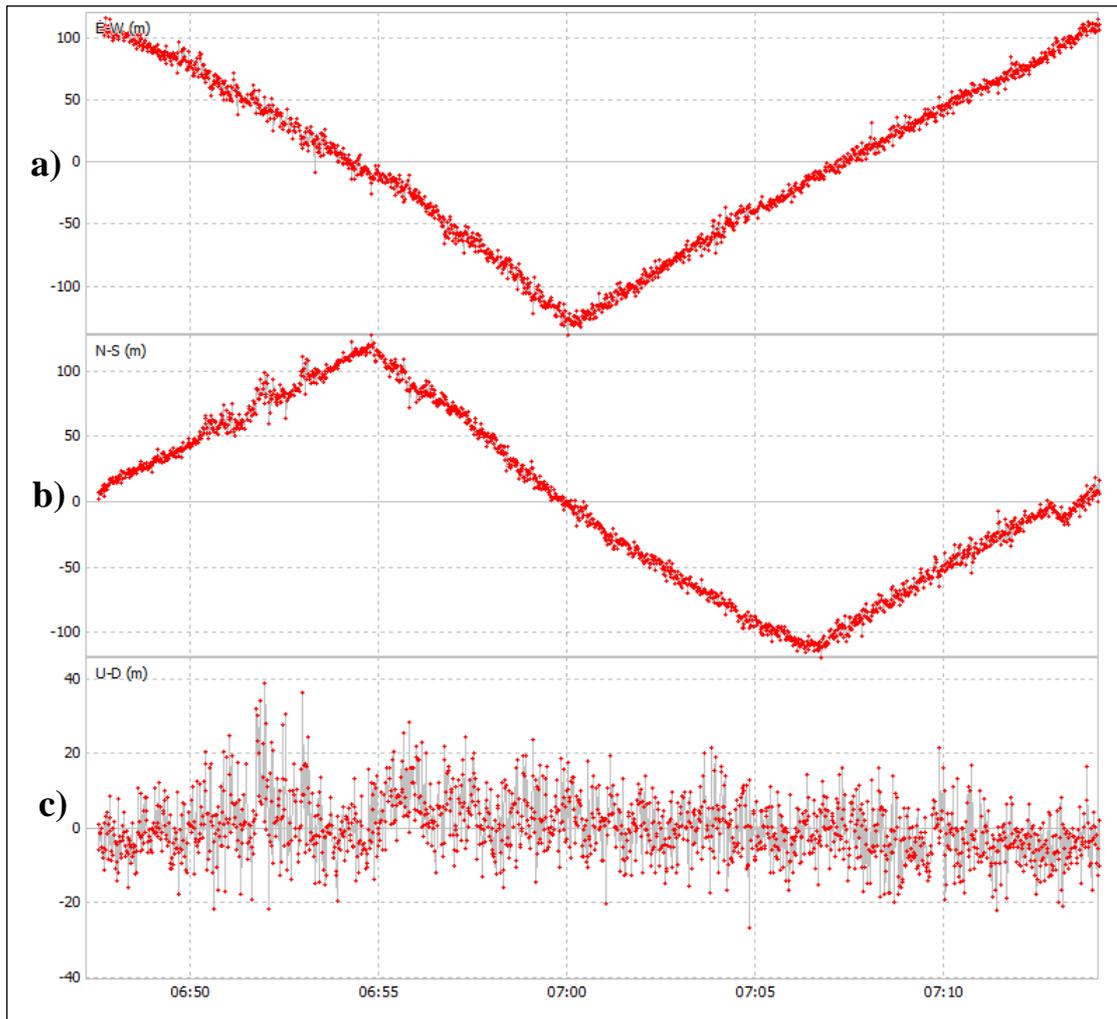


Ilustración 4-43: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-44 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.

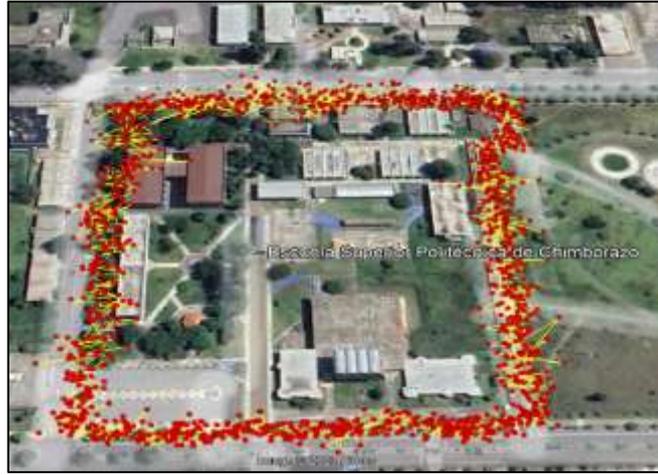


Ilustración 4-44: Trayectoria–Xiaomi 11-Choke ring low-cost con aluminio
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-45 se muestran los datos procesados de la trayectoria realizada con el celular Xiaomi 11 Lite 5G y la antena choke ring low-cost con cinta adhesiva de cobre.

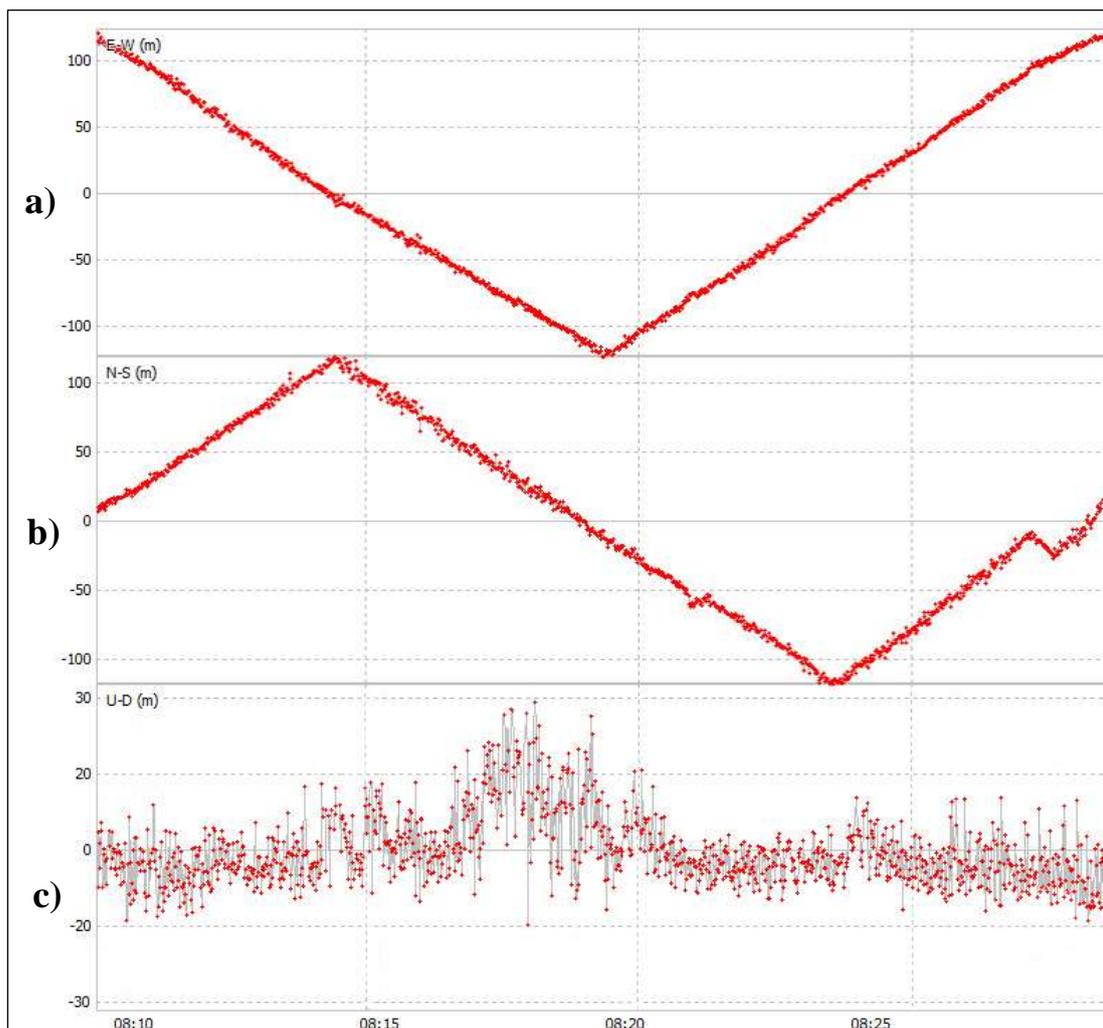


Ilustración 4-45: Procesamiento información GNSS, Modo kinematic, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-46 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.

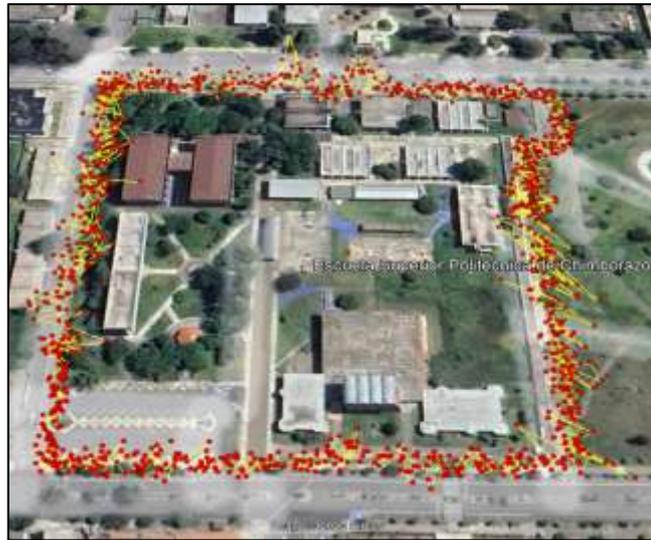


Ilustración 4-46: Trayectoria–Xiaomi 11–Choke ring low-cost con cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

Con respecto a la trayectoria realizada sin la influencia de la antena choke ring low-cost, la precisión de la trayectoria mejora aún más con la antena choke ring low-cost de cobre ya que sus puntos tienden a estar más cerca del valor de cero y sus puntos más altos de error llegan hasta 22 m con el smartphone a L1 (Moto G20) y hasta 29 m con el smartphone a L1 y L5 (Xiaomi 11 Lite a L1). Sin embargo, a pesar de la mejora se tienen picos que se pueden considerar atípicos, pero puede deberse a que durante la trayectoria existen techos de zinc, automóviles, edificios, vegetación, etc. Lo que puede generar dichas variaciones.

4.4.2 *Análisis estadístico*

Dado que en las gráficas de altura se refleja mucho más la variación por causa del efecto multitrayecto se ha realizado el análisis estadístico de estas variables en los respectivos casos: solo celular, celular con influencia de la antena choke ring low-cost de aluminio y celular con la influencia de la antena choke ring low-cost de cobre. Los tres casos con los celulares Moto G20 y Xiaomi 11 Lite 5G.

4.4.2.1 *Pruebas de normalidad*

Para las pruebas de normalidad se ha utilizado la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de significación Lilliefors. Se ha empleado este método debido a que el tamaño muestral es mayor de 50.

Se tiene una muestra de 1000 mediciones en los que se desea saber si la variable de altura en metros sigue una distribución normal.

H_0 : La muestra procede de una distribución normal

H_1 : La muestra no procede de una distribución normal

Para llevar a cabo el contraste, se ha empleado el software SPSS.

Primero se ha llevado a cabo el análisis con la variable Motorola_altura la cual posee los datos de la variación de altura realizados durante la trayectoria sin la influencia de la antena choke ring low-cost, usando únicamente el celular Motorola Moto G20 con su función de GPS encendida y en modo avión. Los resultados de los valores estadísticos descriptivos y la prueba de normalidad se presentan en las Tablas 4-1 y 4-2 respectivamente.

Tabla 4-1: Parámetros estadísticos descriptivos de la variable Motorola_altura

		Descriptivos	
		Estadístico	Error estándar
Motorola_altura	Media	1.10	.339
	95% de intervalo de confianza para la media		
	Límite inferior	.44	
	Límite superior	1.77	
	Media recortada al 5%	.18	
	Mediana	-.57	
	Varianza	114.971	
	Desviación estándar	10.722	
	Mínimo	-41	
	Máximo	49	
	Rango	90	
	Rango intercuartil	10	
	Asimetría	1.487	.077
	Curtosis	4.518	.155

Realizado por: Bonilla E., 2023

Tabla 4-2: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable Motorola_altura

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Motorola_altura	.130	1000	.000	.865	1000	.000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Realizado por: Bonilla E., 2023

En este caso el estadístico ha obtenido un valor de 0.130 y el valor de la significación estadística (p) ha sido 0.000, por tanto, se rechaza H_0 es decir la variable no sigue una distribución normal.

A continuación, se han realizado pruebas gráficas ya que proporcionan sencillez de interpretación. Para esta variable también se tiene la Ilustración 4-47 (gráfico Q-Q) la cual presenta pares de valores, con cada valor observado asociado con su valor esperado, donde este último proviene de una distribución normal. Como se puede observar, los puntos representados casi no coinciden sobre la línea recta por lo que se puede afirmar que los valores no siguen una distribución normal.

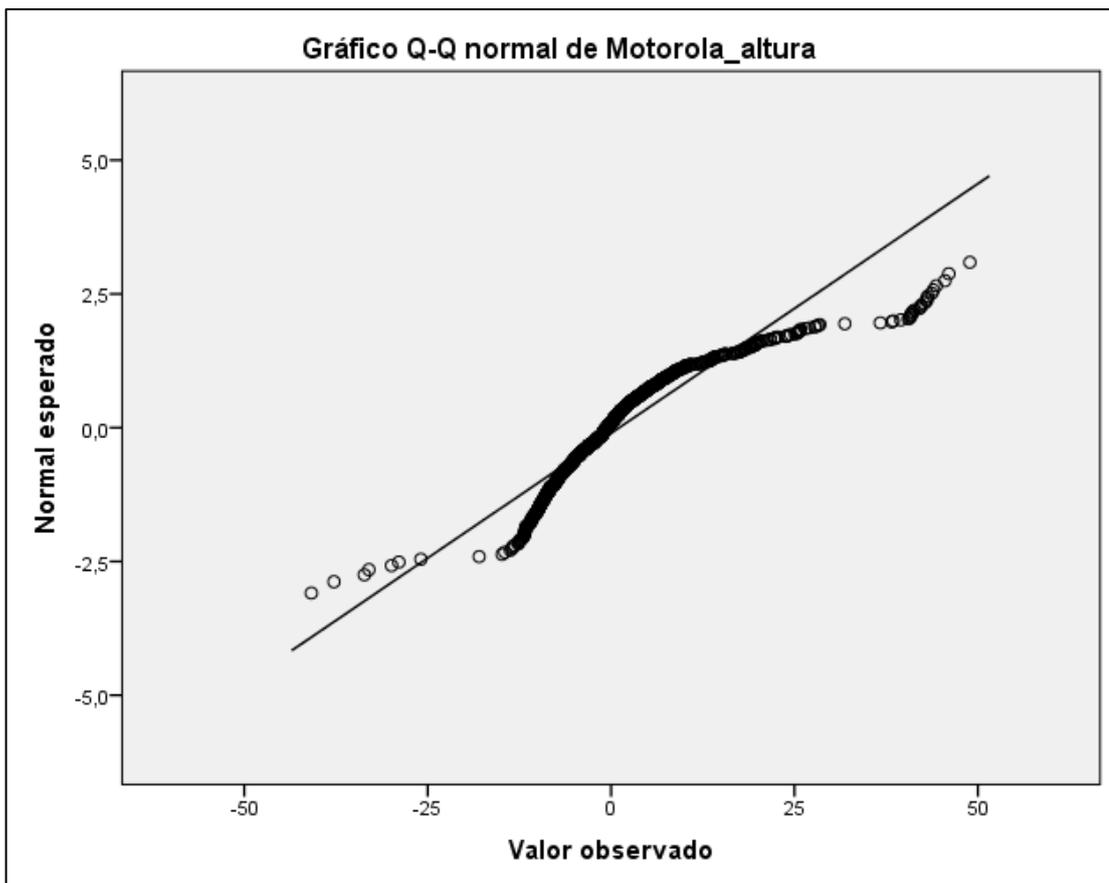


Ilustración 4-47: Gráfico Q-Q normal de la variable Motorola_altura
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-48 se presenta un histograma de la variable Motorola_altura. Se puede observar que la gráfica presenta una morfología muy parecida a una curva de Gauss, sin simetrías y, por tanto, tiene una tendencia a seguir una distribución normal.

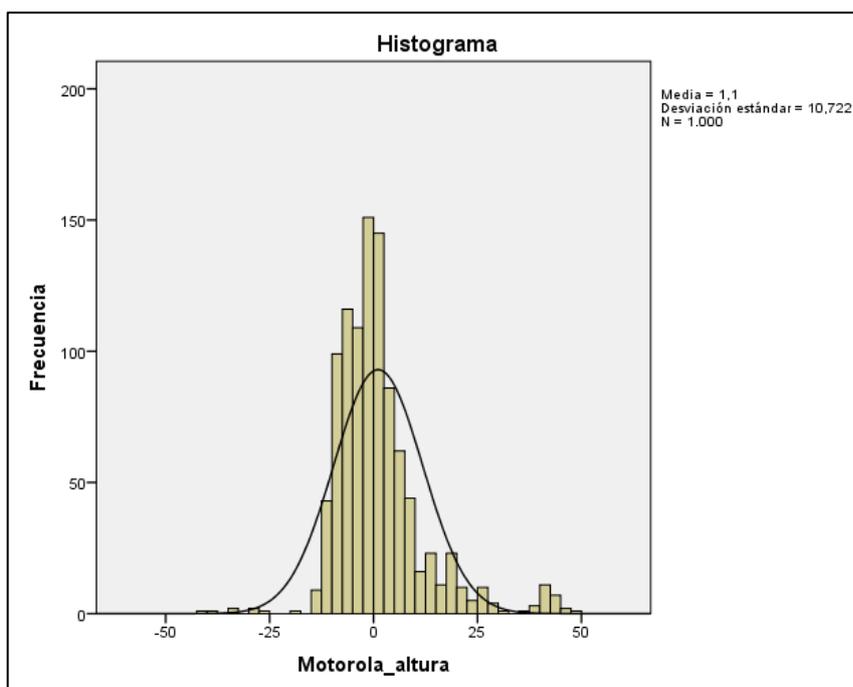


Ilustración 4-48: Histograma de la variable Motorola_altura
Realizado por: Bonilla E., 2023

La siguiente variable que se ha analizado es la variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio la cual posee los datos de la variación de altura realizados durante la trayectoria usando el celular Motorola Moto G20 con su función de GPS encendida y en modo avión y la antena choke ring low-cost de aluminio. Los resultados de los valores estadísticos descriptivos y la prueba de normalidad se presentan en las Tablas 4-3 y 4-4 respectivamente.

Tabla 4-3: Parámetros estadísticos descriptivos-variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio

		Descriptivos	
		Estadístico	Error estándar
MotorolaAlturaChokeRingAluminio	Media	.52	.247
	95% de intervalo de confianza para la media		
	Límite inferior	.04	
	Límite superior	1.01	
	Media recortada al 5%	.18	
	Mediana	-1.82	
	Varianza	60.836	
	Desviación estándar	7.800	
	Mínimo	-14	
	Máximo	29	
	Rango	43	
	Rango intercuartil	12	
	Asimetría	.695	.077
	Curtosis	-.445	.155

Realizado por: Bonilla E., 2023

Tabla 4-4: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MotorolaAlturaChokeRing Aluminio	.128	1000	.000	.934	1000	.000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Realizado por: Bonilla E., 2023

Para este caso el estadístico ha obtenido un valor de 0.128 y el valor de la significación estadística (p) ha sido 0.000, por tanto, se rechaza H_0 es decir la variable no sigue una distribución normal.

Para esta variable también se tiene la Ilustración 4-49 (gráfico Q-Q) donde se puede observar que los puntos representados casi coinciden sobre la línea recta por lo que se puede afirmar que los valores de esta variable siguen una distribución normal.

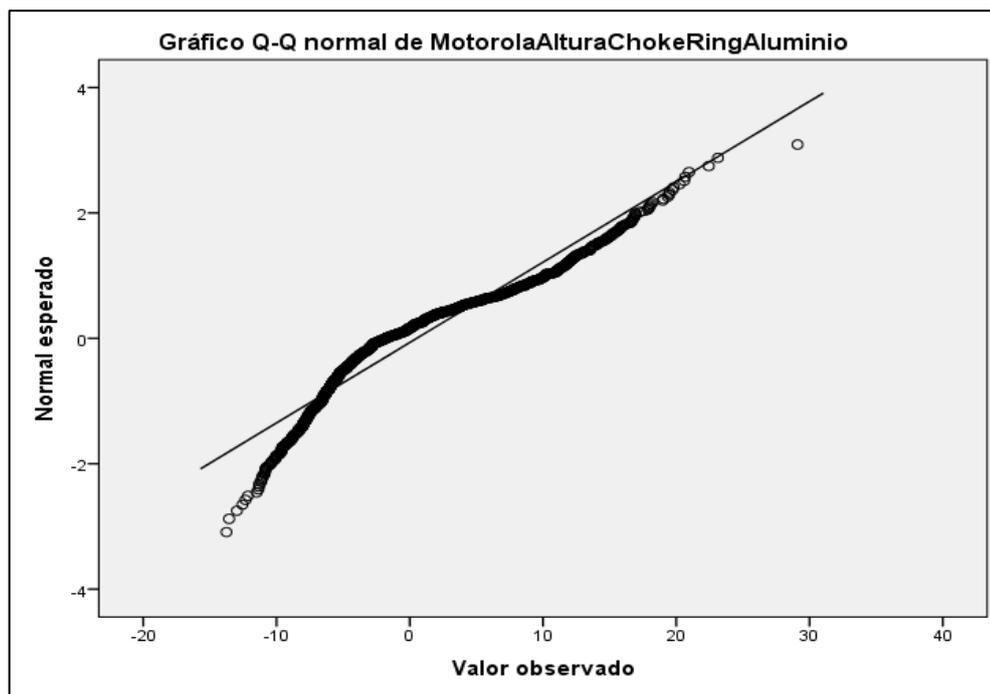


Ilustración 4-49: Gráfico Q-Q normal de la variable MotorolaAlturaChokeRing Aluminio

Realizado por: Bonilla E., 2023

El histograma de la Ilustración 4-50 de la variable MotorolaAlturaChokeRingAluminio presenta una morfología casi parecida a una curva de Gauss, sin simetrías. Sin embargo, solo tiene una tendencia a seguir una distribución normal.

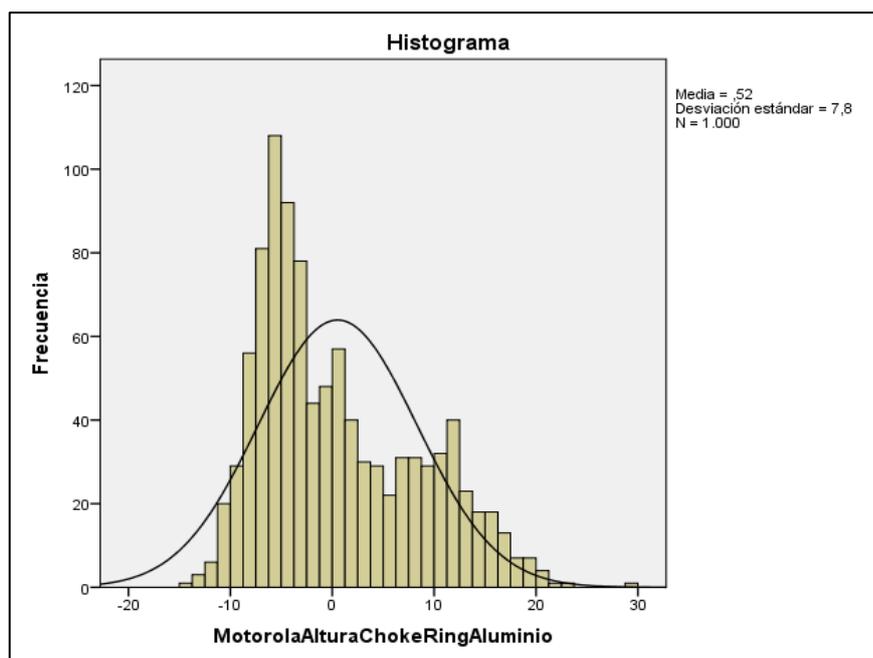


Ilustración 4-50: Histograma de la variable MotorolaAlturaChokeRing Aluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

La siguiente variable que se ha analizado es la variable MotorolaAlturaChokeRingCobre la cual posee los datos de la variación de altura realizados durante la trayectoria usando el celular Motorola Moto G20 con su función de GPS encendida y en modo avión y la antena choke ring low-cost de cobre. Los resultados de los valores estadísticos descriptivos y la prueba de normalidad se presentan en las Tablas 4-5 y 4-6 respectivamente.

Tabla 4-5: Parámetros estadísticos descriptivos - variable MotorolaAlturaChokeRingCobre

		Descriptivos	
		Estadístico	Error estándar
MotorolaAlturaChokeRingCobre	Media	.25	.185
	95% de intervalo de confianza para la media		
	Límite inferior	-.11	
	Límite superior	.62	
	Media recortada al 5%	.10	
	Mediana	-.28	
	Varianza	34.045	
	Desviación estándar	5.835	
	Mínimo	-34	
	Máximo	21	
	Rango	55	
	Rango intercuartil	7	
	Asimetría	.225	.077
Curtosis	2.295	.155	

Realizado por: Bonilla E., 2023

Tabla 4-6: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable MotorolaAlturaChokeRingCobre

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MotorolaAlturaChokeRing Cobre	.061	1000	.000	.965	1000	.000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Realizado por: Bonilla E., 2023

Para este caso el estadístico ha obtenido un valor de 0.061 y el valor de la significación estadística (p) ha sido 0.000, por tanto, se rechaza H_0 es decir la variable no sigue una distribución normal.

Para esta variable también se tiene la Ilustración 4-51 (gráfico Q-Q) donde se puede observar que los puntos representados casi coinciden sobre la línea recta por lo que se puede afirmar que los valores de esta variable siguen una distribución normal.

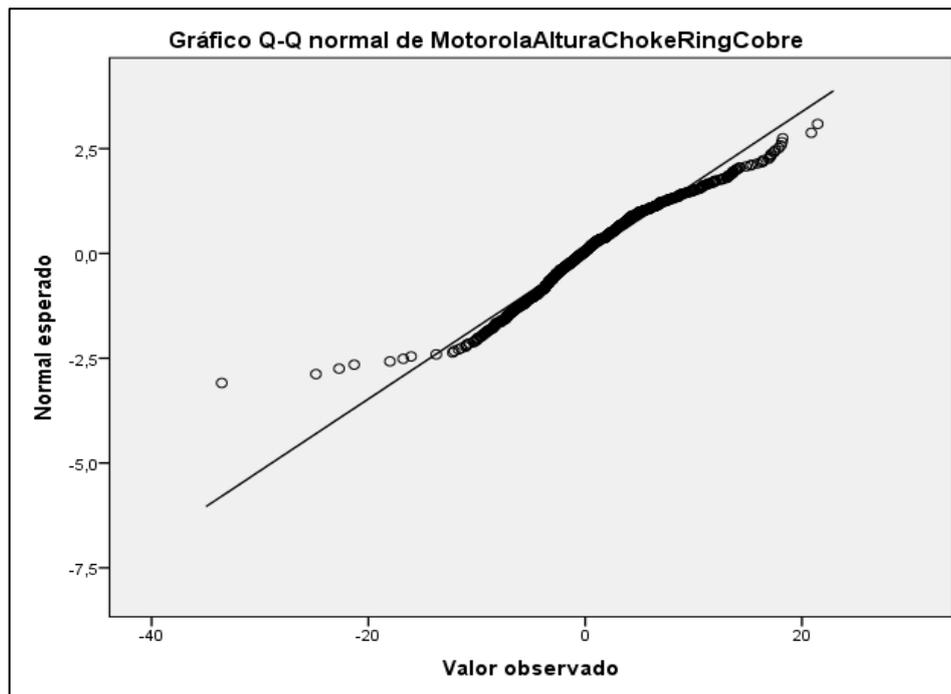


Ilustración 4-51: Gráfico Q-Q normal de la variable MotorolaAlturaChokeRingCobre

Realizado por: Bonilla E., 2023

El histograma de la Ilustración 4-52 de la variable MotorolaAlturaChokeRingCobre presenta una morfología muy parecida a una curva de Gauss, por lo tanto, esta variable sigue una distribución normal.

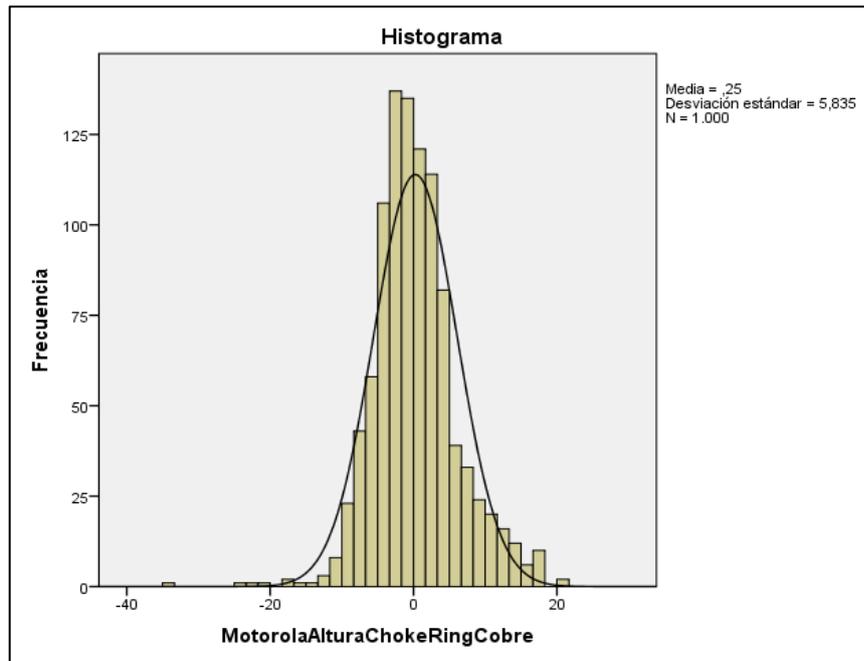


Ilustración 4-52: Histograma de la variable MotorolaAlturaChokeRingCobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

La siguiente variable que se ha analizado es XiaomiAltura la cual posee los datos de la variación de altura realizados durante la trayectoria usando el celular Xiaomi 11 Lite 5G con su función de GPS encendida y en modo avión y sin la influencia de la antena choke ring low-cost. Los resultados de los valores estadísticos descriptivos y la prueba de normalidad se presentan en las Tablas 4-7 y 4-8 respectivamente.

Tabla 4-7: Parámetros estadísticos descriptivos – variable XiaomiAltura

		Descriptivos	
		Estadístico	Error estándar
XiaomiAltura	Media	-.15	.496
	95% de intervalo de confianza para la media		
	de Límite inferior	-1.12	
	Límite superior	.82	
	Media recortada al 5%	-1.06	
	Mediana	-2.05	
	Varianza	245.932	
	Desviación estándar	15.682	
	Mínimo	-53	
	Máximo	96	
	Rango	150	
	Rango intercuartil	17	
	Asimetría	1.241	.077
Curtosis	4.243	.155	

Realizado por: Bonilla E., 2023

Tabla 4-8: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable XiaomiAltura

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
XiaomiAltura	.088	1000	.000	.924	1000	.000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Realizado por: Bonilla E., 2023

Para este caso el estadístico ha obtenido un valor de 0.088 y el valor de la significación estadística (p) ha sido 0.000, por tanto, se rechaza H_0 es decir la variable no sigue una distribución normal.

Para esta variable también se tiene la Ilustración 4-53 (gráfico Q-Q) donde se puede observar que los puntos representados casi coinciden sobre la línea recta salvo por algunos valores atípicos de las mediciones, por lo tanto, sigue una distribución normal.

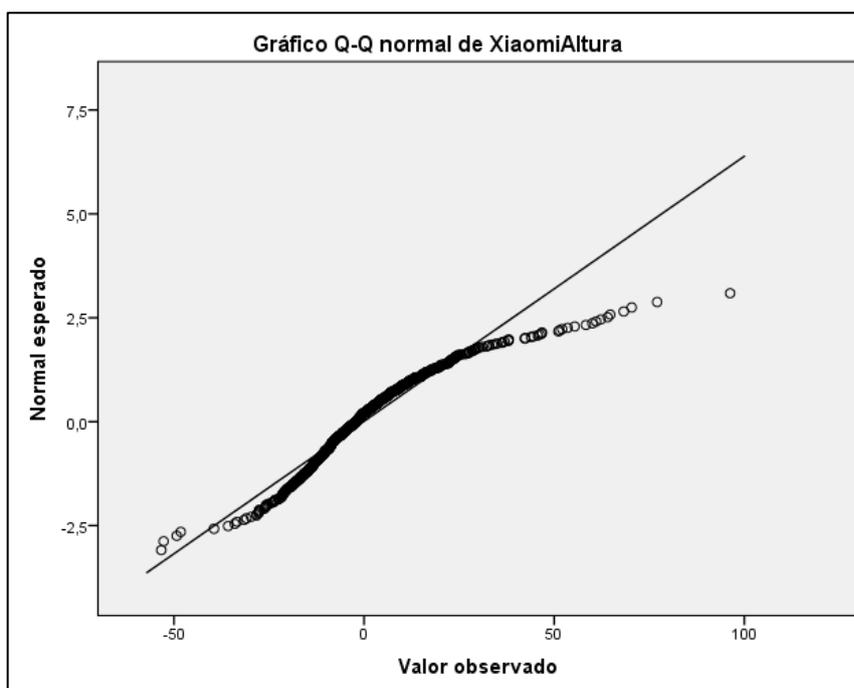


Ilustración 4-53: Gráfico Q-Q normal de la variable XiaomiAltura

Realizado por: Bonilla E., 2023

El histograma de la Ilustración 4-54 de la variable XiaomiAltura presenta una forma muy parecida a una curva de Gauss, por lo tanto, esta variable sigue una distribución normal.

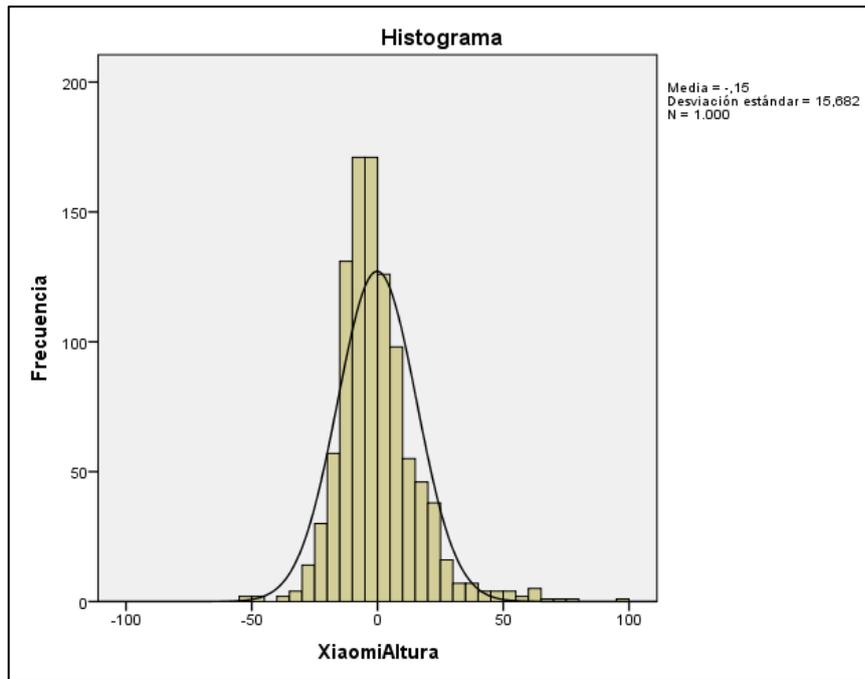


Ilustración 4-54: Histograma de la variable XiaomiAltura
Realizado por: Bonilla E., 2023

La siguiente variable que se ha analizado es XiaomiAlturaChokeRingAluminio la cual posee los datos de la variación de altura realizados durante la trayectoria usando el celular Xiaomi 11 Lite 5G con su función de GPS encendida y en modo avión y la antena choke ring low-cost de aluminio. Los resultados de los valores estadísticos descriptivos y la prueba de normalidad se presentan en las Tablas 4-9 y 4-10 respectivamente.

Tabla 4-9: Parámetros estadísticos descriptivos – variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio

		Descriptivos	
		Estadístico	Error estándar
XiaomiAlturaChokeRingAluminio	Media	-.03	.270
	95% de intervalo de confianza para la media		
	Límite inferior	-.56	
	Límite superior	.50	
	Media recortada al 5%	-.29	
	Mediana	-.80	
	Varianza	72.935	
	Desviación estándar	8.540	
	Mínimo	-27	
	Máximo	39	
	Rango	65	
	Rango intercuartil	10	
	Asimetría	.548	.077
Curtosis	.882	.155	

Realizado por: Bonilla E., 2023

Tabla 4-10: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
XiaomiAlturaChokeRingAluminio	.059	1000	.000	.982	1000	.000

a. Corrección de significación de Lilliefors
Realizado por: Bonilla E., 2023

Para este caso el estadístico ha obtenido un valor de 0.059 y el valor de la significación estadística (p) ha sido 0.000, por tanto, se rechaza H_0 es decir la variable no sigue una distribución normal.

Para esta variable también se tiene la Ilustración 4-55 (gráfico Q-Q) donde se puede observar que los puntos representados casi coinciden sobre la línea recta salvo por algunos valores atípicos de las mediciones al final de la línea, por lo tanto, la variable sigue una distribución normal.

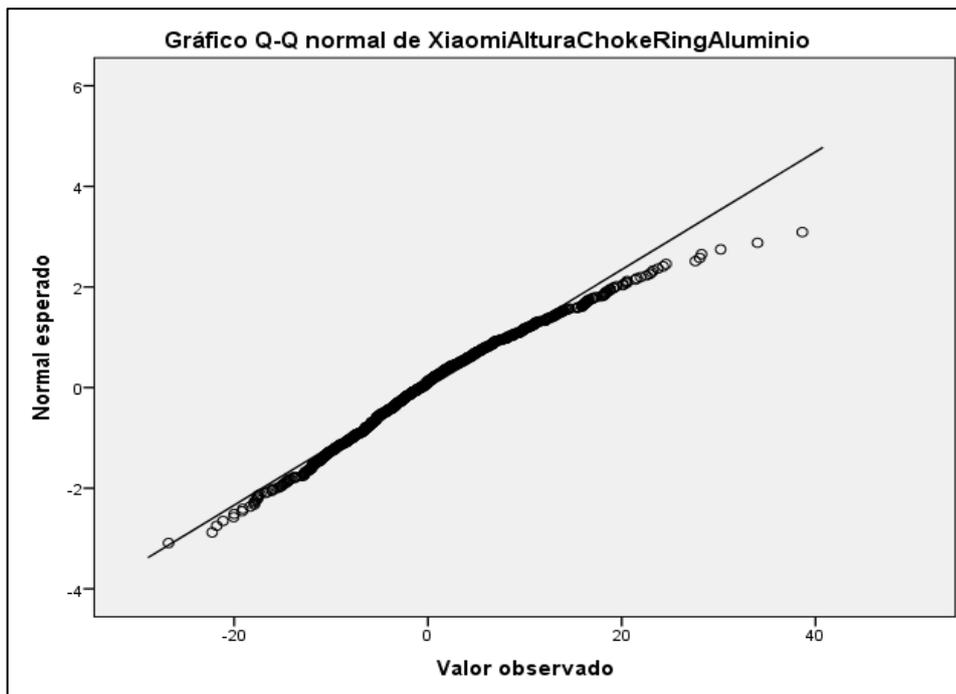


Ilustración 4-55: Gráfico Q-Q normal de la variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

El histograma de la Ilustración 4-56 de la variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio presenta una forma muy parecida a una curva de Gauss, por lo tanto, esta variable sigue una distribución normal.

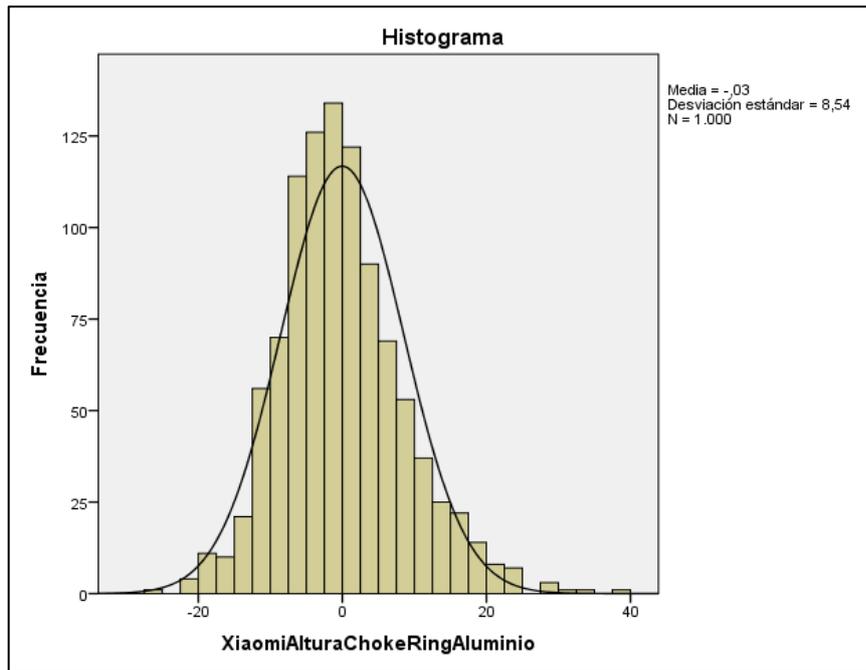


Ilustración 4-56: Histograma de la variable XiaomiAlturaChokeRing Aluminio

Realizado por: Bonilla E., 2023

La siguiente variable que se ha analizado es XiaomiAlturaChokeRingCobre la cual posee los datos de la variación de altura realizados durante la trayectoria usando el celular Xiaomi 11 Lite 5G con su función de GPS encendida y en modo avión y la antena choke ring low-cost de cobre. Los resultados de los valores estadísticos descriptivos y la prueba de normalidad se presentan en las Tablas 4-11 y 4-12 respectivamente.

Tabla 4-11: Parámetros estadísticos descriptivos – variable XiaomiAlturaChokeRingCobre

		Descriptivos	
		Estadístico	Error estándar
XiaomiAlturaChokeRing	Media	.91	.329
Cobre	95% de intervalo de confianza para la media	.26	
	Límite inferior		
	Límite superior	1.55	
	Media recortada al 5%	.14	
	Mediana	-1.21	
	Varianza	107.940	
	Desviación estándar	10.389	
	Mínimo	-35	
	Máximo	46	
	Rango	82	
	Rango intercuartil	10	
	Asimetría	1.324	.077
	Curtosis	2.812	.155

Realizado por: Bonilla E., 2023

Tabla 4-12: Pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov con corrección Lilliefors – variable XiaomiAlturaChokeRingCobre

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
XiaomiAlturaChokeRingCobre	.135	1000	.000	.902	1000	.000

a. Corrección de significación de Lilliefors
Realizado por: Bonilla E., 2023

Para este caso el estadístico ha obtenido un valor de 0.135 y el valor de la significación estadística (p) ha sido 0.000, por tanto, se rechaza H_0 es decir la variable no sigue una distribución normal.

Para esta variable también se tiene la Ilustración 4-57 (gráfico Q-Q) donde se puede observar que los puntos representados casi coinciden sobre la línea recta salvo por algunos valores atípicos de las mediciones, por lo tanto, la variable sigue una distribución normal.

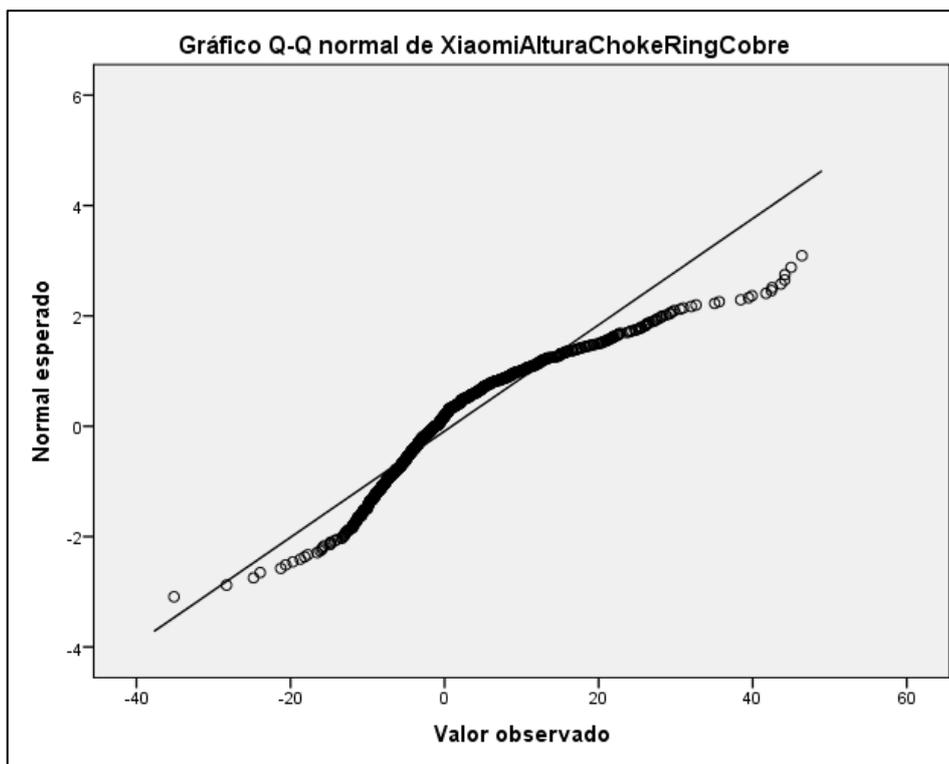


Ilustración 4-57: Gráfico Q-Q normal de la variable XiaomiAlturaChokeRingCobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

El histograma de la Ilustración 4-58 de la variable XiaomiAlturaChokeRingCobre presenta una forma muy parecida a una curva de Gauss, sin simetrías, por lo tanto, esta variable sigue una distribución normal.

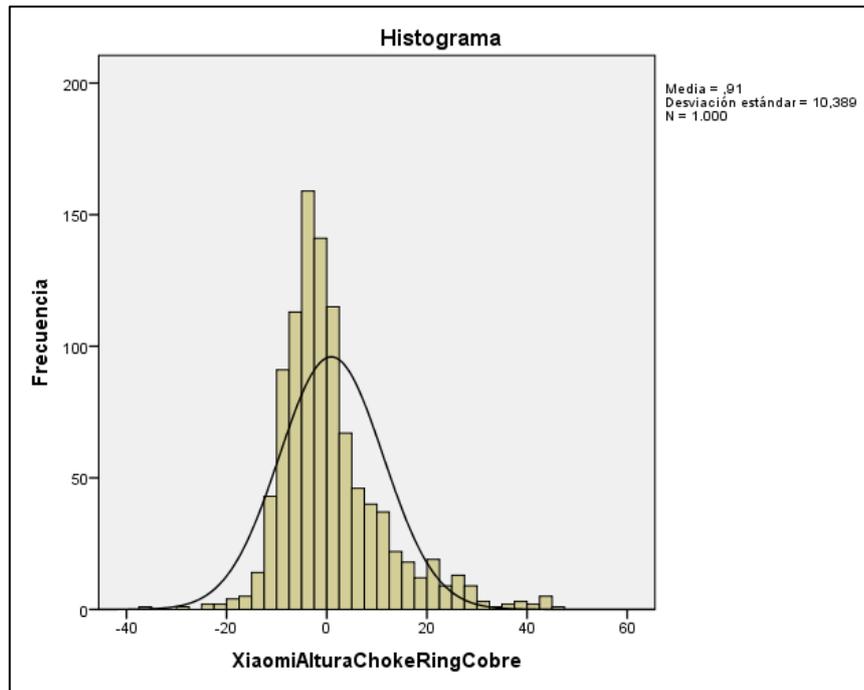


Ilustración 4-58: Histograma de la variable XiaomiAlturaChokeRingAluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4.2.2 Análisis estadístico de errores

En la Ilustración 4-59 se muestra la comparación entre el perfil del recorrido con las muestras tomadas por el celular Motorola Moto G20 durante los 533.47 m.

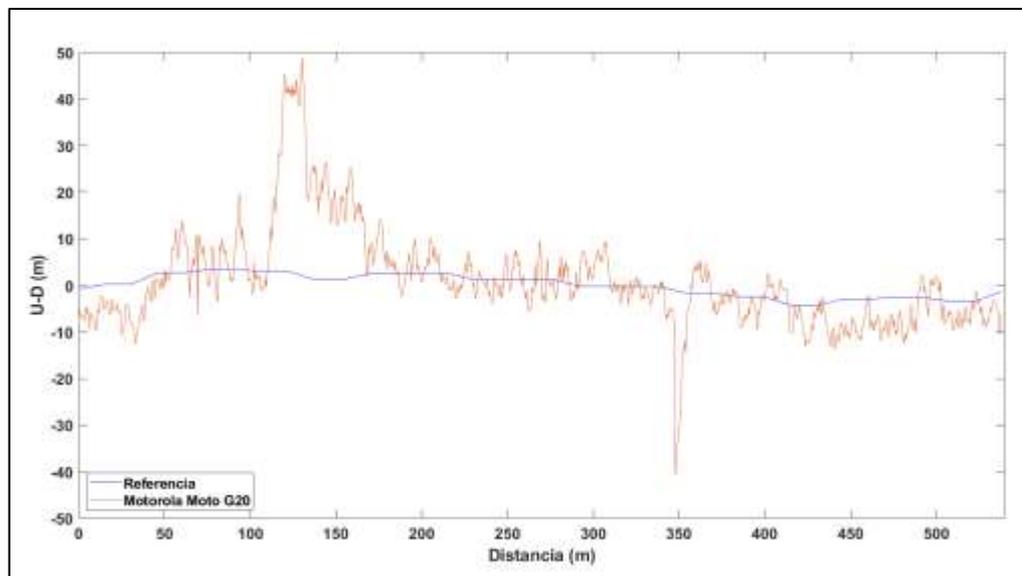


Ilustración 4-59: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Motorola Moto G20
Realizado por: Bonilla E., 2023

La Ilustración 4-60 en cambio muestra la comparación entre el perfil de la trayectoria de referencia y las muestras tomadas con el celular Motorola Moto G20 con la influencia de la antena choke ring low-cost de aluminio.

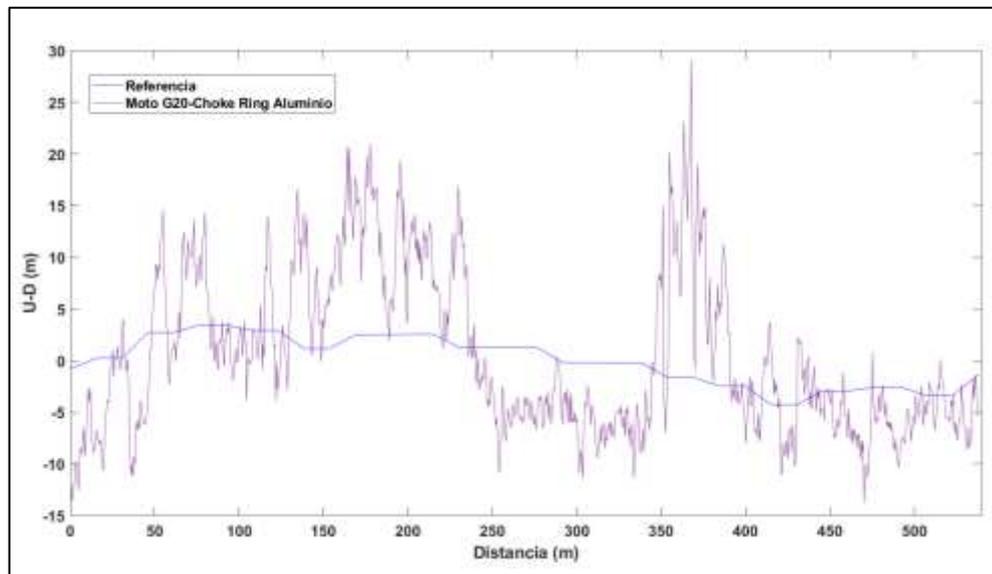


Ilustración 4-60: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Motorola Moto G20 con Choke Ring low-cost de Aluminio.

Realizado por: Bonilla E., 2023

Igualmente, la Ilustración 4-61 en muestra la comparación entre el perfil de la trayectoria de referencia y las muestras tomadas con el celular Motorola Moto G20 con la influencia de la antena choke ring low-cost de cobre.

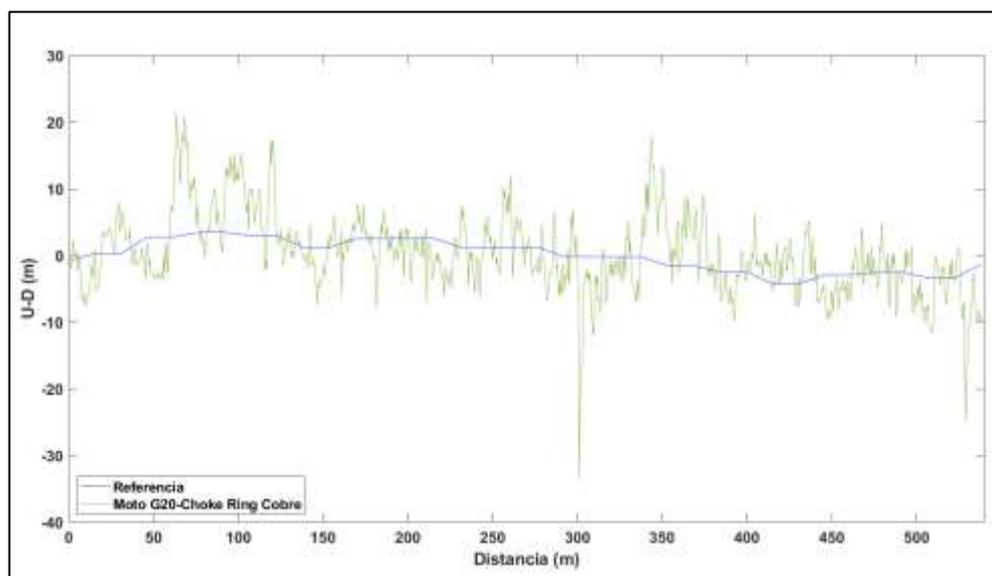


Ilustración 4-61: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Motorola Moto G20 con Choke Ring low-cost de Cobre.

Realizado por: Bonilla E., 2023

A continuación, se muestra la Tabla 4-1 donde se proporcionan los valores del RMSE (Root Mean Square Error, por sus siglas en inglés) que se calcularon para evaluar la precisión de cada caso en relación con los valores de referencia.

Un RMSE más bajo indica una mayor precisión del modelo, ya que los errores individuales son más pequeños en promedio. En este caso el RMSE se expresa en m. Seguidamente se muestra la Ecuación 4-13 para el cálculo del RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\text{valor real}_i - \text{valor estimado}_i)^2}$$

Ecuación 4-1: Fórmula para calcular el RMSE

Donde:

M: Número total de datos

Tabla 4-13: RMSE calculado en los tres casos con el Motorola Moto G20.

Caso	Valor de RMSE
Motorola Moto G20	9.6237
Motorola Moto G20 y Choke Ring de Aluminio	7.0444
Motorola Moto G20 y Choke Ring de Cobre	5.1596

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-62 se muestra la comparación entre el perfil del recorrido con las muestras tomadas por el celular Xiaomi 11 Lite 5G durante los 533.47 m.

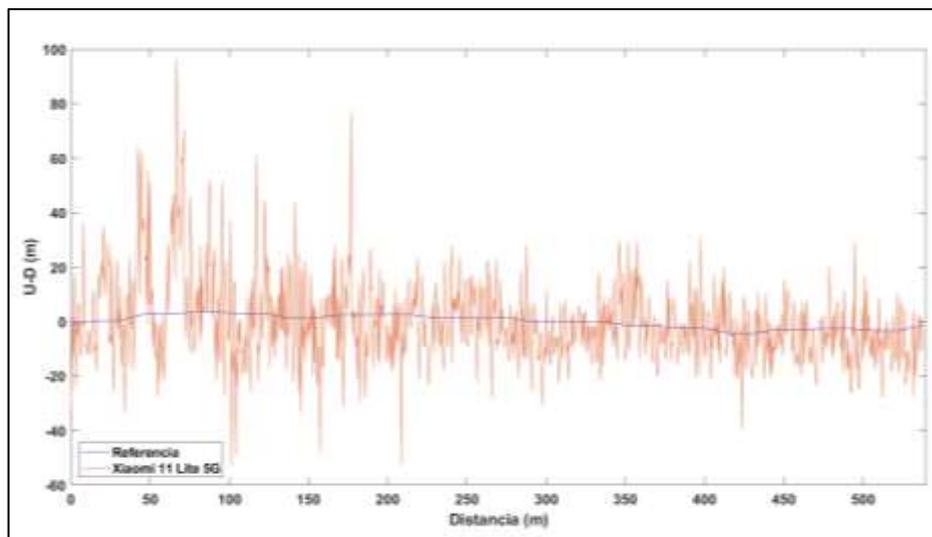


Ilustración 4-62: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Xiaomi 11 Lite 5G.

Realizado por: Bonilla E., 2023

La Ilustración 4-63 en cambio muestra la comparación entre el perfil de la trayectoria de referencia y las muestras tomadas con el celular Xiaomi 11 Lite 5G con la influencia de la antena choke ring low-cost de aluminio.

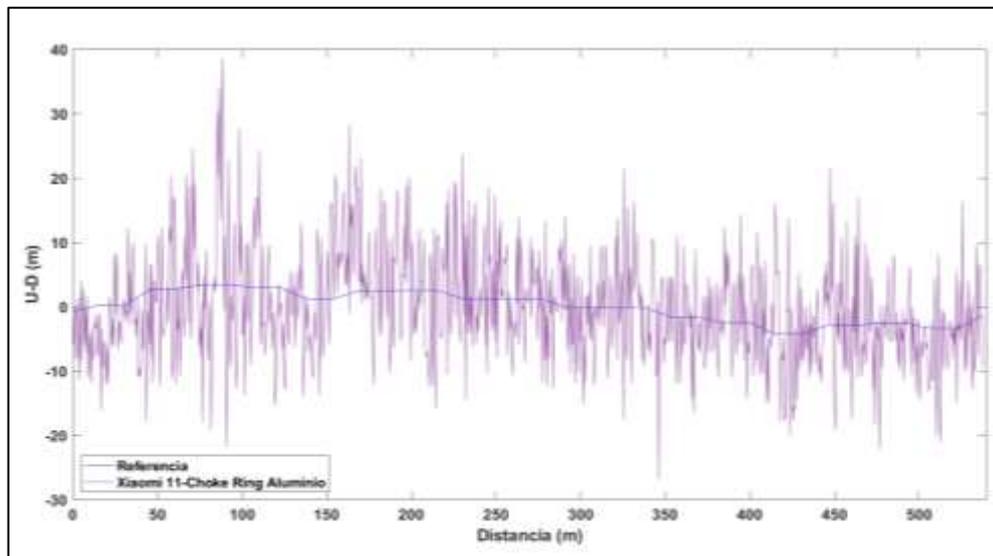


Ilustración 4-63: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Xiaomi 11 Lite 5G con Choke Ring low-cost de Aluminio.

Realizado por: Bonilla E., 2023

Igualmente, la Ilustración 4-64 muestra la comparación entre el perfil de la trayectoria de referencia y las muestras tomadas con el celular Xiaomi 11 Lite 5G con la influencia de la antena choke ring low-cost de cobre.

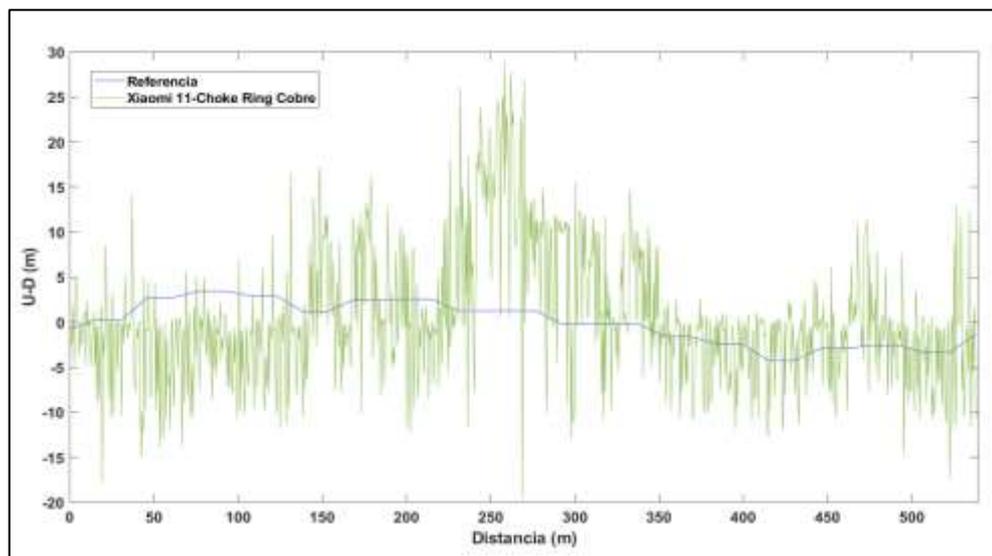


Ilustración 4-64: Recorrido de referencia frente a las muestras recolectadas por el Xiaomi 11 Lite 5G con Choke Ring low-cost de Cobre.

Realizado por: Bonilla E., 2023

A continuación, se muestra la Tabla 4-14 donde se proporcionan los valores del RMSE que se calcularon para evaluar la precisión de cada caso en relación con los valores de referencia con el celular Xiaomi 11 Lite 5G.

Tabla 4-14: RMSE calculado en los tres casos con el Xiaomi 11 Lite 5G.

Caso	Valor de RMSE
Xiaomi 11 Lite 5G	13.1769
Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring de Aluminio	8.1223
Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring de Cobre	7.3215

Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4.2.3 Diagrama de cajas y bigotes

El diagrama de cajas y bigotes es una representación gráfica utilizada en estadística para visualizar la distribución y los valores atípicos de un conjunto de datos.

Además, muestra la información como:

- Mediana (Línea central en la caja)
- El primer cuartil (Límite inferior de la caja)
- El tercer cuartil (Límite superior de la caja)
- Los valores mínimo y máximo (bigotes)
- Los valores atípicos o fuera de rango (puntos individuales fuera de los bigotes)

En la Ilustración 4-65 se muestra el diagrama de cajas y bigotes de los tres casos con el celular Motorola Moto G20. En el caso donde solo se realizó la trayectoria con el celular se obtuvieron muchos valores atípicos y su valor de RMSE es el más alto, sin embargo, la concentración de los valores es buena. En el segundo caso donde se tiene la antena choke ring low-cost con aluminio no se tienen valores atípicos, pero en cambio se tiene baja concentración y más variabilidad en los datos, pero tienen un mejor valor en cuanto al RMSE, y para el caso donde se tiene la antena choke ring low-cost de cobre se tienen unos pocos valores atípicos y su concentración es buena además tienen el valor más bajo de RMSE de entre los tres casos.

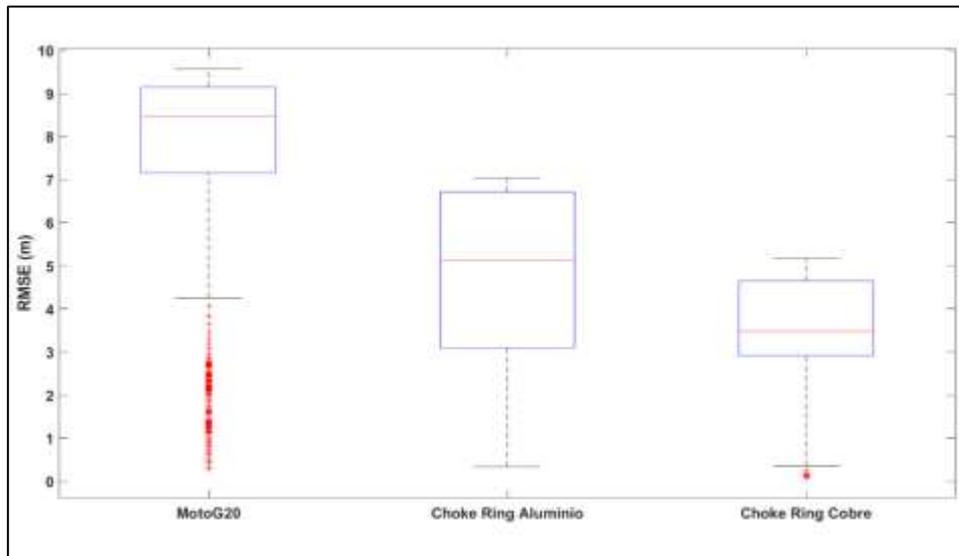


Ilustración 4-65: Diagrama de cajas y bigotes en los tres casos con el smartphone Motorola Moto G20
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-66 se muestra el diagrama de cajas y bigotes de los tres casos con el celular Xiaomi 11 Lite 5G. En el primer caso donde se realizó la trayectoria solo con el celular se obtuvieron varios valores atípicos su concentración su variabilidad de datos es baja, pero se tiene un valor alto de RMSE. En el segundo caso donde se tiene la antena choke ring low-cost con aluminio se tienen algunos valores atípicos, su concentración es más baja de entre los tres casos. En el tercer caso con la antena choke ring low-cost con cobre no se tienen valores atípicos, su valor de RMSE es el más bajo de entre los tres casos, pero su concentración no es tan buena como con la antena choke ring low-cost con aluminio.

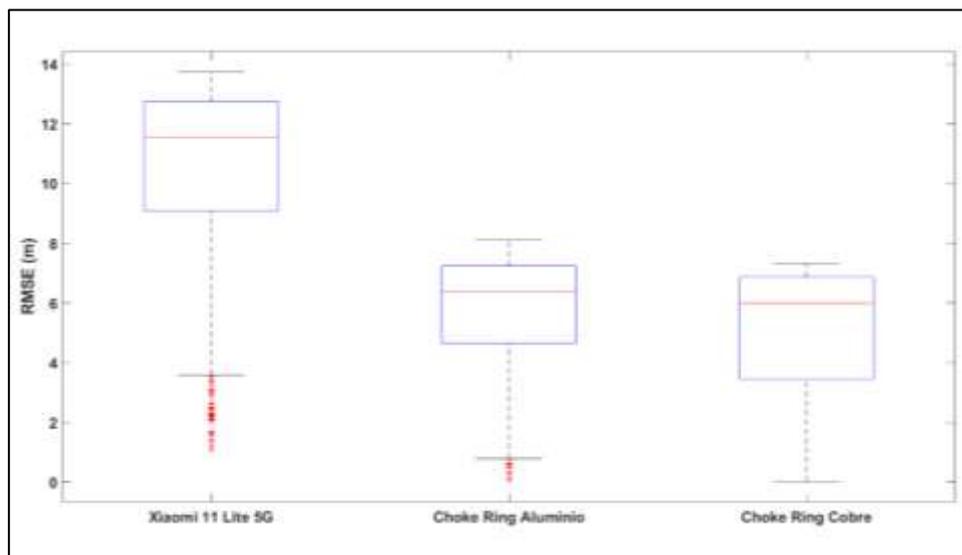


Ilustración 4-66: Diagrama de cajas y bigotes en los tres casos con el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G.
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4.3 Medición estática

4.4.3.1 Escenario para la toma de datos

Las pruebas estáticas se realizaron durante el mes de junio de 2023 en la ciudad de Riobamba en un barrio residencial, el sector presenta casas de hasta tres pisos y zonas con vegetación. Se realizaron mediciones de aproximadamente 10 minutos en modo static con Geo++ RINEX Logger, la aplicación toma una muestra cada 1 segundo.

La Ilustración 4-67 muestra el escenario que se tuvo durante las pruebas estáticas con la antena choke ring low-cost con aluminio y cobre.

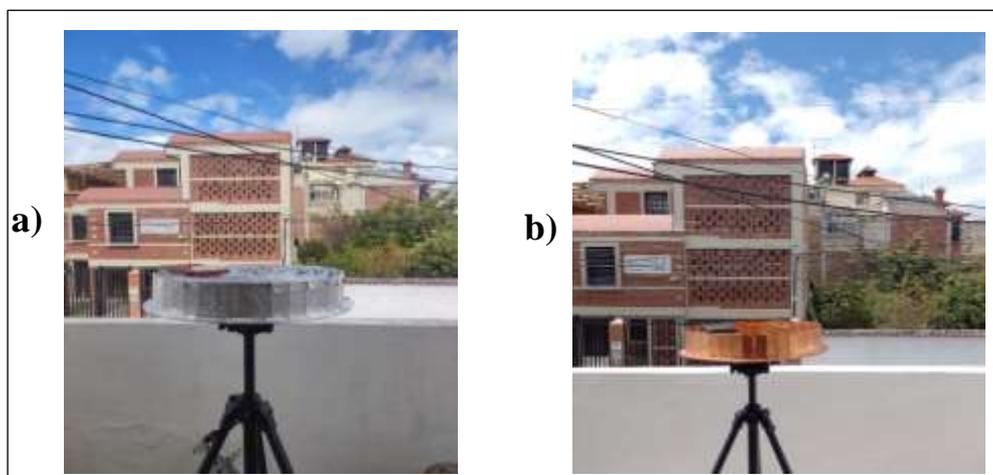


Ilustración 4-67: Escenario para la toma de datos GNSS en modo estático a) Choke Ring con aluminio b) Choke Ring con Cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4.3.2 Post procesamiento de datos

La primera medición se realizó con el celular Motorola Moto G20 y sin la influencia de la antena choke ring low-cost, con el celular en modo avión, con la opción de GPS encendida. La Ilustración 4-68 muestra los puntos recogidos durante la prueba estática.



Ilustración 4-68: Datos GNSS obtenidos en prueba estática utilizando el smartphone Moto G20
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-69 se muestran los datos procesados de la prueba estática en RTKLIB. En las siguientes gráficas a), b) y c) se muestran las posiciones calculadas en el espacio donde se observa la variación del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo. East-West, North-South y Up-Down respectivamente.

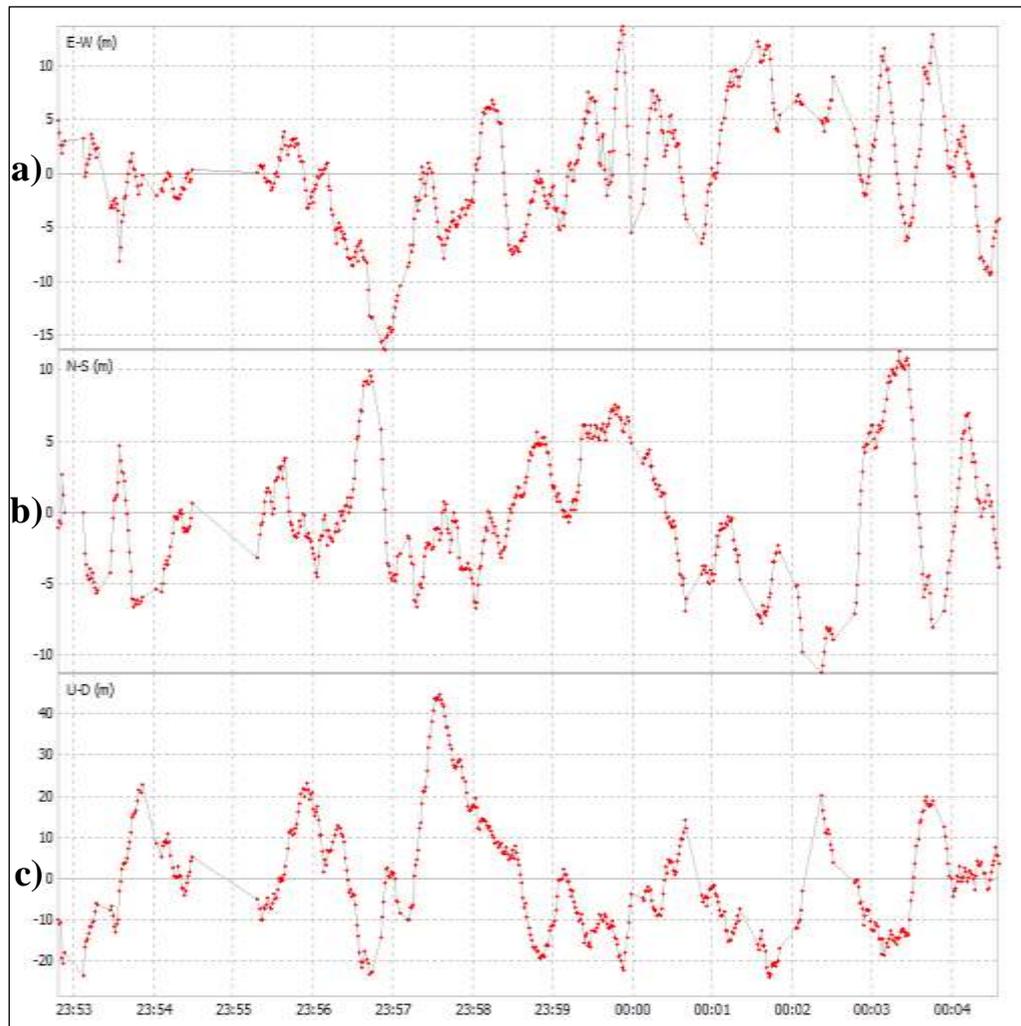


Ilustración 4-69: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Moto G20 en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-70 se muestran los datos procesados de la prueba estática realizada con el celular Motorola Moto G20 y la antena choke ring low-cost con aluminio. Las gráficas a) y b) muestran la trayectoria desde las diferentes perspectivas y la gráfica c) muestra la variación del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo. East-West, North-South y Up-Down respectivamente.

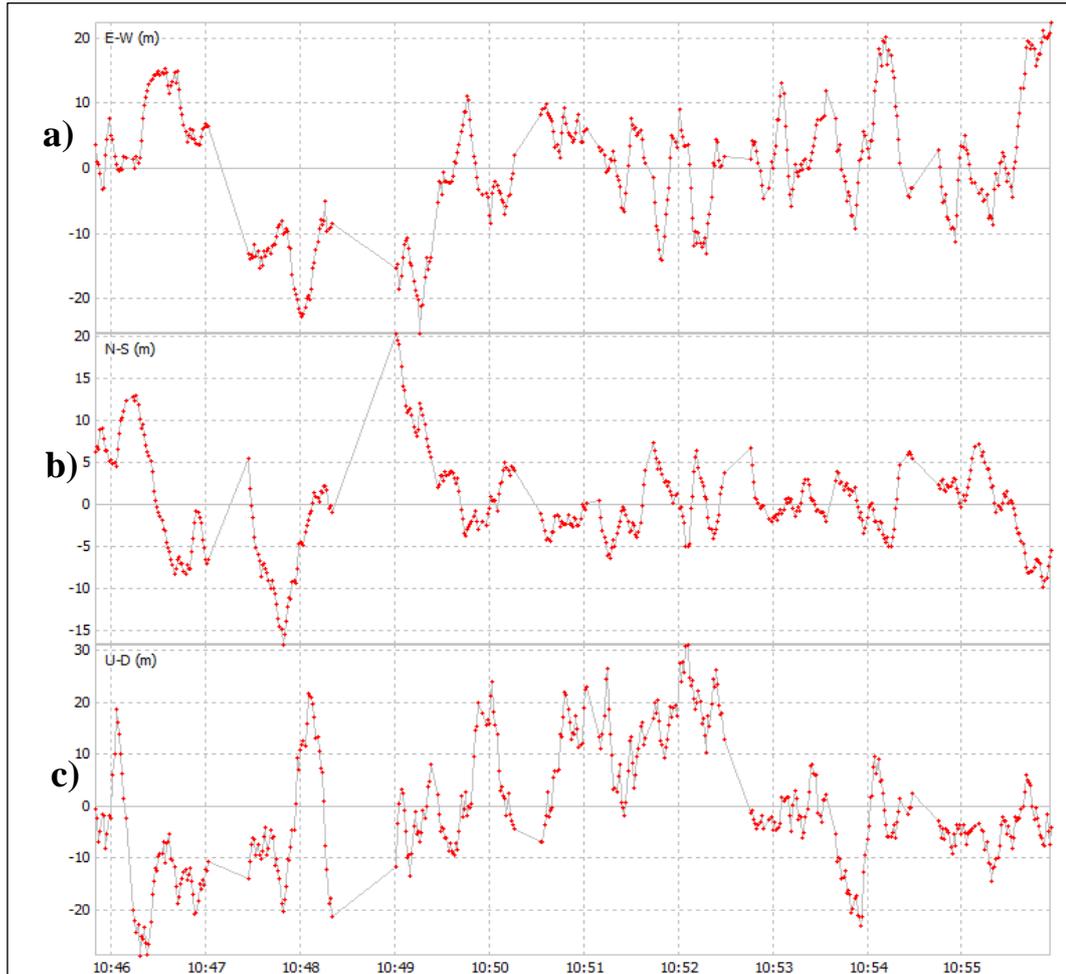


Ilustración 4-70: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-71 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.



Ilustración 4-71: Toma de datos GNSS en la prueba estática utilizando el smartphone Moto G20 y Choke ring low-cost con aluminio
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-72 se muestran los datos procesados de la prueba estática realizada con el celular Motorola Moto G20 y la antena choke ring low-cost con cobre. Las gráficas a) y b) muestran la trayectoria desde las diferentes perspectivas y la gráfica c) muestra la variación del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo. East-West, North-South y Up-Down respectivamente.

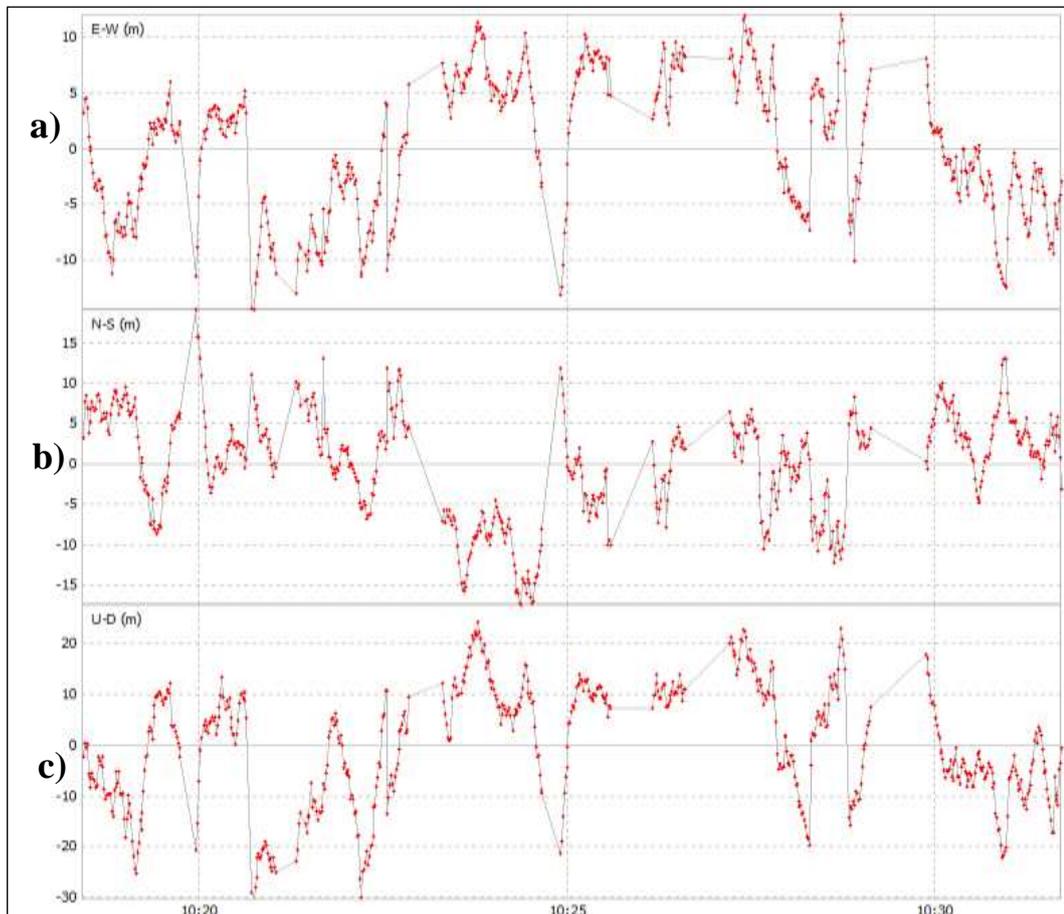


Ilustración 4-72: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Moto G20 y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-73 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.

La siguiente medición se realizó con el celular Xiaomi 11 Lite 5G y sin la influencia de la antena choke ring low-cost, con el celular en modo avión, únicamente teniendo encendido la opción de GPS. La Ilustración 4-74 muestra los puntos recogidos durante la prueba estática.



Ilustración 4-73: Toma de datos GNSS prueba estática utilizando el smartphone Moto G20-Choke ring low-cost con cobre
 Realizado por: Bonilla E., 2023



Ilustración 4-74: Toma de datos GNSS prueba estática utilizando el Smartphone Xiaomi 11 Lite 5G
 Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-75 se muestran los datos procesados de la prueba estática. En las siguientes gráficas a), b) y c) se muestran las posiciones calculadas en el espacio donde se observa la variación del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo. East-West, North-South y Up-Down respectivamente.

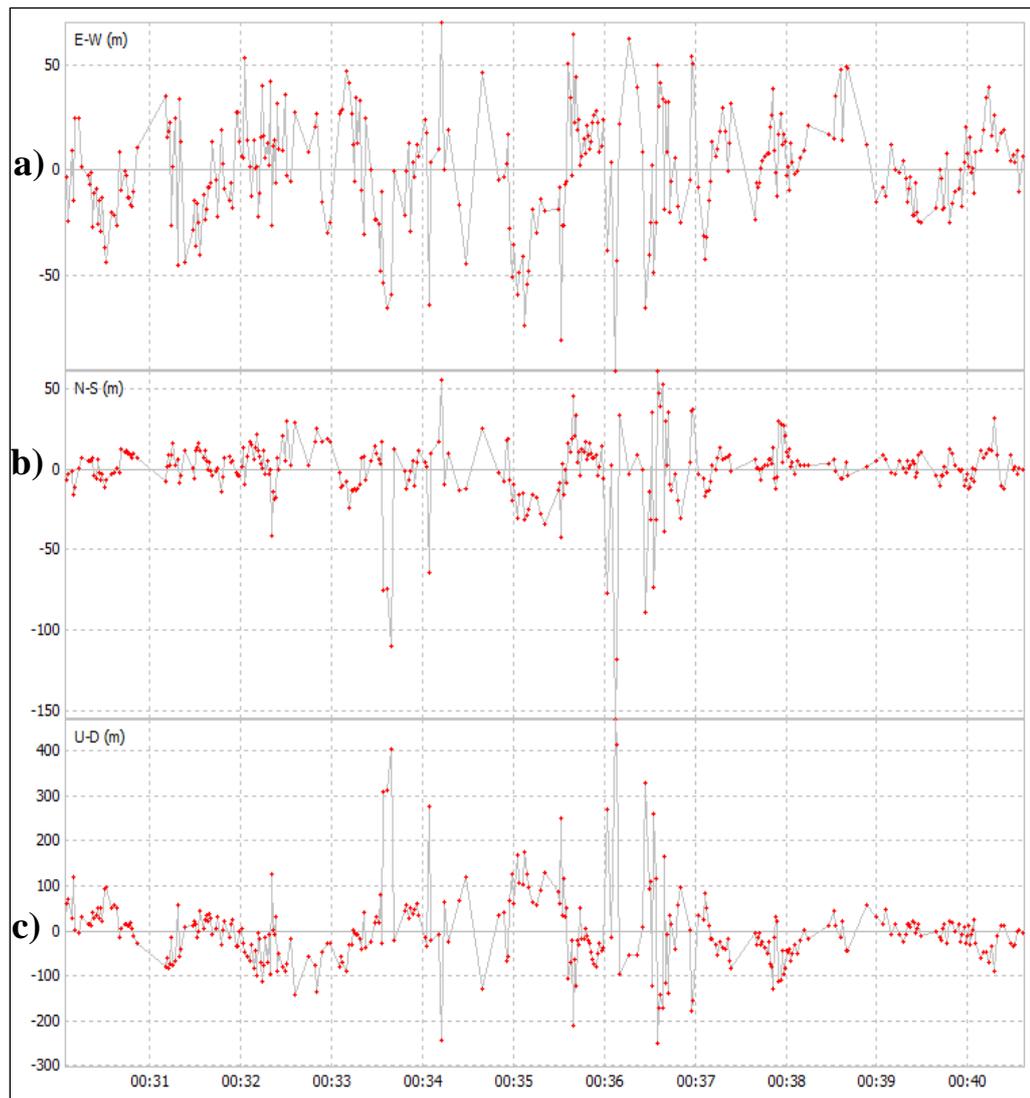


Ilustración 4-75: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Xiaomi 11 Lite 5G en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-76 se muestran los datos procesados de la prueba estática realizada con el celular Xiaomi 11 Lite 5G y la antena choke ring low-cost con aluminio. Las gráficas a) y b) muestran la trayectoria desde las diferentes perspectivas y la gráfica c) muestra la variación del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo. East-West, North-South y Up-Down respectivamente.

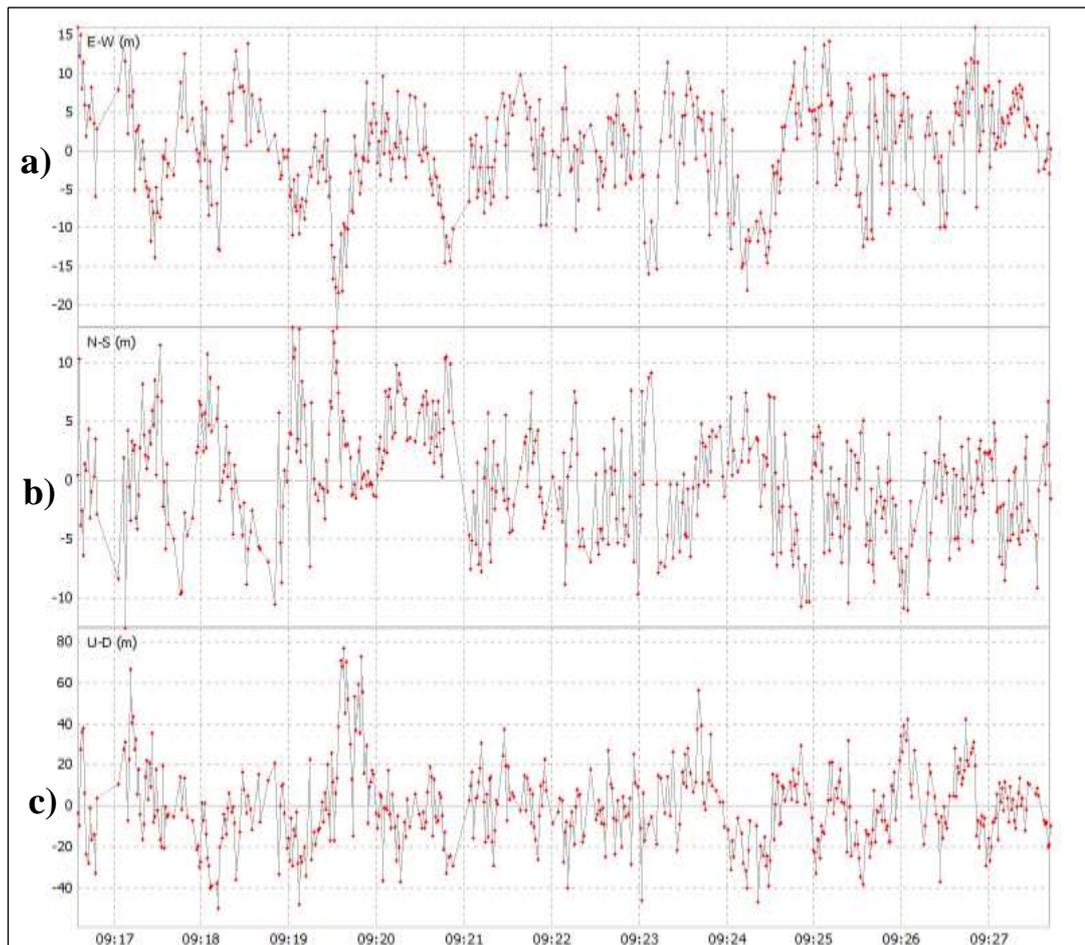


Ilustración 4-76: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con aluminio en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-77 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.



Ilustración 4-77: Toma de datos GNSS en la prueba estática utilizando el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G – Choke ring low-cost con aluminio

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-78 se muestran los datos procesados de la prueba estática realizada con el celular Xiaomi 11 Lite 5G y la antena choke ring low-cost con cobre. Las gráficas a) y b) muestran la trayectoria desde las diferentes perspectivas y la gráfica c) muestra la variación del efecto multitrayecto a lo largo del tiempo. East-West, North-South y Up-Down respectivamente.

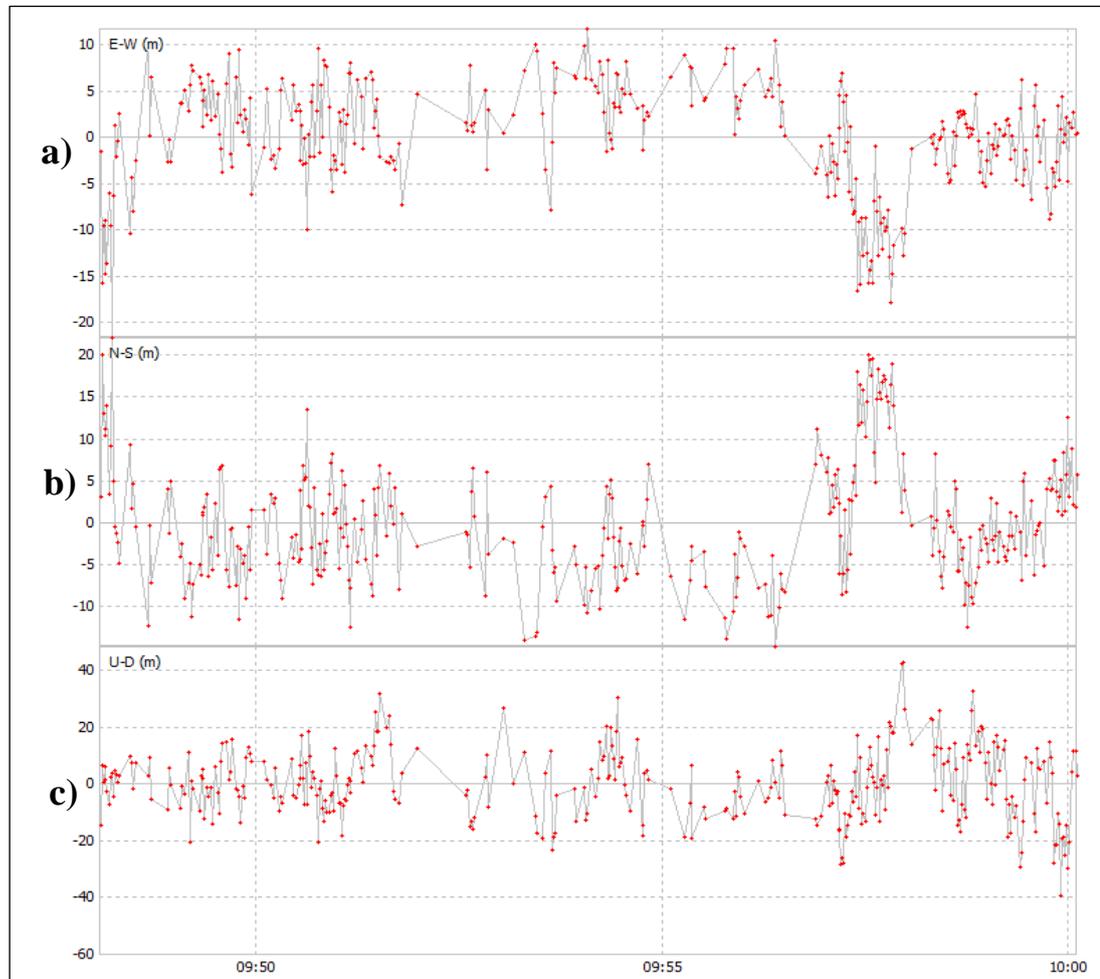


Ilustración 4-78: Procesamiento información GNSS, Modo estático, con Xiaomi 11 Lite 5G y Choke Ring low-cost con cobre en sistema de coordenadas ENU a) East b) North c) Up
Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Ilustración 4-79 se muestra la exportación de la trayectoria en formato KML para visualizarlo Google Earth.



Ilustración 4-79: Toma de datos GNSS en la prueba estática utilizando el smartphone Xiaomi 11 Lite 5G - Choke ring low-cost con cobre
Realizado por: Bonilla E., 2023

4.4.4 *Discusión de resultados*

De acuerdo con los resultados de las simulaciones se pudo conocer primero el comportamiento del campo eléctrico. Al transmitir una señal a las frecuencias de GPS se puede conocer su dirección e intensidad en cada punto de la superficie del diseño de la choke ring como reflector lo cual permite optimizar la dirección de las ondas electromagnéticas. También se simuló la distribución de corriente que fluye por la superficie al generarse entre la interacción de la onda incidente y el material conductor ya que ésta influye en la eficiencia y dirección de la reflexión.

Respecto a los coeficientes de reflexión simulados a las frecuencias de L1 y L5 en comparación a la implementación, se obtuvieron mejores resultados con el diseño de la choke ring con cobre. Además, con el diseño de aluminio y cobre los anillos 1 y 2 tiene una mejor respuesta.

En cuanto a la obtención de los patrones de radiación, se realizó una comparación entre el diagrama de radiación de las antenas monopolo a las frecuencias de GPS sin influencia de la choke ring y con su influencia con los diseños de aluminio y cobre. Igualmente, al colocar las antenas monopolo entre los anillos 1 y 2 se obtuvo una mejor respuesta, incluso en algunos casos se mejoró la potencia y la directividad.

Acerca de las trayectorias realizadas, se analizaron principalmente las gráficas con respecto a la altura dada en metros obtenidas con los celulares Motorola Moto G20 y Xiaomi 11 Lite 5G con el software RTKLIB. Con respecto al cálculo del RMSE los dos celulares con la influencia de la choke ring low-cost de cobre tienen menor valor.

Además, con los gráficos de cajas y bigotes se pudo verificar que con el celular Moto G20 se tienen muchos valores atípicos durante la medición, en cambio con la influencia de antena choke ring de aluminio no se tienen valores atípicos, pero se pierde la concentración de valores y con la

antena choke ring de cobre se tienen pocos valores atípicos y una mejora en la concentración de valores con respecto a los dos casos anteriores.

El gráfico de cajas y bigotes con el celular Xiaomi 11 Lite 5G en cambio indica que con el celular sin la influencia de la antena choke ring low-cost se tienen igualmente varios valores atípicos. Con la influencia de la choke-ring con aluminio igualmente se tienen valores atípicos, pero se tiene una mejora en la concentración de valores y con la influencia de la choke-ring de cobre no se tienen valores atípicos y la concentración está considerada entre los dos casos anteriores.

Igualmente, para el análisis de las mediciones estáticas con los dos diseños de la antena choke-ring low-cost se pudo comprobar que el diseño implementado con cobre proporciona menos errores en cuanto latitud, longitud y altura.

4.4.5 Costo

En este apartado se detalla el costo de los materiales necesarios para construir una antena choke ring low-cost. A continuación, en la Tabla 4-15 se detallan los instrumentos, cantidades y costos.

Tabla 4-15: Costo del instrumental para implementación antena choke ring low-cost

Instrumental	Cantidad	Coste
Smartphone Motorola Moto G20	1	\$183.74
Smartphone Xiaomi 11 Lite 5G	1	\$350.00
Impresión 3D diseño reflector	1	\$50.00
Papel Aluminio	1	\$1.50
Cinta adhesiva de cobre	1	\$20.00

Realizado por: Bonilla E., 2023

En la Tabla 4-16 se detallan los costos de acuerdo con el diseño de la antena choke ring low-cost.

Tabla 4-16: Costo de acuerdo con el diseño de la antena choke ring low-cost

Smartphone	Tipo de reflector	Coste
Motorola Moto G20	Choke Ring de aluminio	\$235.24
	Choke Ring de cobre	\$253.74
Smartphone Xiaomi 11 Lite 5G	Choke Ring de aluminio	\$401.50
	Choke Ring de cobre	\$420.00

Realizado por: Bonilla E., 2023

CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó una antena choke ring low-cost con una técnica de fabricación económica como es la base de PLA y materiales conductores asequibles como el papel aluminio y la cinta adhesiva de cobre.
- Al analizar los parámetros de funcionamiento de la antena choke ring low-cost se observó que reduce el efecto multitrayecto además de que proporciona una mejora en términos de directividad y potencia de las antenas al analizar su diagrama de radiación con la influencia del reflector tipo choke ring.
- El diseño e implementación de antenas parche y monopolo a las frecuencias L1 y L5 de GPS permiten crear un escenario de prueba, entre el transmisor y la antena choke ring low-cost con el receptor para realizar las pruebas de trayectoria y en modo estática.
- La simulación de la antena choke ring low-cost permitió observar su funcionamiento y comportamiento al recibir señales dentro de la banda L de frecuencia de GPS en términos de campo eléctrico y corriente superficial.
- Con las pruebas realizadas acerca del coeficiente de reflexión y diagramas de radiación de diferentes antenas con la influencia de la antena choke ring low-cost se pudo conocer cuál es la ubicación óptima para colocar los smartphones cuando se realizaban las mediciones de información GNSS.
- Se pudo evaluar el rendimiento de la antena choke ring low-cost en ambientes severos de multipath y el efecto que tiene esta sobre la mitigación del ruido sobre las antenas GPS de los smartphones a través de la prueba de trayectoria y tipo estática, analizando la variación de las coordenadas East, North y Up del sistema ENU. Demostrando que la antena choke ring low-cost de cobre es la mejor opción debido a que sus datos tienen menor variabilidad y menor valor de RMSE.

RECOMENDACIONES

- Para realizar las mediciones en la trayectoria y en modo estático se recomienda revisar que las funciones de los smartphones como ubicación y modo avión se encuentren activas, igualmente examinar que estas funciones sean las únicas encendidas ya que otras podrían causar interferencias.
- Se recomienda revisar el datasheet de los smartphones para identificar donde se encuentran sus antenas y procesadores de GPS para ubicarlos correctamente en el reflector entre el segundo y primer anillo.
- Al utilizar la aplicación móvil Geo++ RINEX Logger se recomienda activar la opción “Generate hourly files” para obtener los archivos de medición (.23o) por separado ya que al no activar la opción los datos podrán sobreponerse y perderse la información.
- Al encender la opción de ubicación en los smartphones se sugiere esperar de 1 a 2 minutos (dependiendo del smartphone) ya que durante este tiempo se podrán captar señales de varios satélites en el espacio para poder obtener datos de GNSS más precisos.
- Si se requiere mayor precisión en la obtención de datos GNSS se recomienda activar la opción de Wi-Fi o datos móviles ya que el procesador puede utilizar información adicional de estas funciones para mejorar la rapidez y precisión al determinar la ubicación, especialmente en áreas donde pueda haber obstáculos.
- Para la obtención de los archivos de navegación (.23N) se recomienda descargarlos directamente desde la página oficial del Instituto Geográfico Militar del Ecuador asegurándose de seleccionar la fecha en que se ha realizado la medición ya que los datos geográficos pueden variar con el tiempo debido a cambios naturales o actualizaciones cartográficas.

BIBLIOGRAFÍA

ANRITSU. *RF/Microwave Signal Generator MG3690C*. [En línea]. 2023. [Consulta: 20 abril 2023]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/mg3690c>

ANRITSU. *Spectrum Master High Performance Handheld Spectrum Analyzer MS2724C*. [En línea]. 2023. [Consulta: 20 abril 2023]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms2724c>

ARIAS, Francisco; et al. Utilización de Estaciones de Referencia de Operación Continua (CORS) en Mediciones Geodésicas y Georreferenciación Utilizando Servicios de Posicionamiento en Línea. [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria, El Salvador. Noviembre de 2021. [Consulta: 15 abril 2023]. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/25593/1/TESIS%20ESTACIONES%20CORS.pdf>

AUDEMARD, F.A.; et al. "Instalación de estaciones geodésicas de monitoreo continuo para fines geocientíficos en el margen caribe sureste". *Boletín de Geología* [en línea], 2020, (España) 42(2), pp. 15-30. [Consulta: 15 abril 2023]. ISSN 2145-8553. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v42n2/2145-8553-boge-42-02-15.pdf>

AANAR, Ángel; et al. *Antenas* [en línea]. Segunda. Catalunya-España: Ediciones UPC, 2002. [Consulta: 16 mayo 2023]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36797>

BALANIS, Constantine. *Advanced Engineering Electromagnetics*, Segunda. New York-USA: John Wiley and Sons, 2012.

BALANIS, Constantine. *Antenna Theory: Analysis and Design*, Cuarta.. New York-USA: John Wiley and Sons, 2016, pp. 3-785.

BEDFORD, Lennon; et al. "New 3D Four Constellation High Performance Wideband Choke Ring Antenna". *Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of The Institute of Navigation* [en línea], 2009, (USA), pp. 829-835. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8365>

CAMARGO, Santana. Estudio y Diseño de metodología con Técnicas GPS para la Actualización de la Cartografía Catastral del Municipio Palavecino (Venezuela) [En línea]. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, España, 2011. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11298/tesisUPV3541.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

CAMPOZANO, Iris R.; & RIERA, María A. "Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones". *Publicaciones en Ciencias y Tecnología* [en línea], 2022, (Ecuador) 16(1), pp. 42-53. [Consulta: 20 mayo 2023]. ISSN 1856-8890. Disponible en: <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt/article/view/4022>

CISNEROS, David. *Proceso de Geodesia IGM CEPGE-REGME*. [En línea]. Noviembre de 2014. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <https://docplayer.es/6050289-Avances-en-la-actualizacion-del-sistema-de-referencia-sirgas-ecuador.html>

COAGUILA, Ronald. Modelamiento y diseño de una antena GNSS de choques frontales [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. 2021. pp. 35-54. [Consulta: 20 agosto 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13485>

NTCA_02002. *Procesos. Observación y procesamiento GNSS.*

DOVIS, F. *GNSS Interference Threats and Countermeasures [en línea].* Londres: Artech House, 2015. [Consulta: 22 septiembre 2022]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9100186/metrics#metrics>

DUARTE, C. *Estructura de las Señales del GPS.* [En línea]. 2016. [Consulta: 22 septiembre 2022] Disponible en: <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=350>

EDITORIAL TEAMS - EVERYTHINGRF. *What is a Choke Ring Antenna?.* [en línea]. 13 de Enero de 2020. [Consulta: 17 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-choke-ring-antenna#:~:text=Editorial%20Team%20%2D%20everything%20RF&text=A%20choke%20ring%20antenna%20is,by%20several%20concentric%20conductive%20rings.>

EMARA, Mohamed; et al. "A Low-Profile Dual-Band Tunable AMC Structure for GNSS Antennas and Its Performance Trade-Offs". 2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM) [en línea], 2019, (Canadá), pp. 1-4. [Consulta: 17 agosto 2022]. ISSN 2473-3555. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/ANTEM.2018.8573028>.

EMARA, Mohamed; et al. "A Low-Cost Light-weight 3D-printed Choke Ring for Multipath Mitigation for GNSS Antennas". 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting [en línea], 2019, (USA), pp. 721-722. [Consulta: 17 agosto 2022]. ISSN 1947-1491. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888998>.

ESCOBAR, Melissa; et al. "Uso del software RTKLIB para el procesamiento de señales GPS". *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica* [en línea], 2020, (Argentina) 6, pp. 230-239. [Consulta: 10 junio 2023], ISSN 2422-6424. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.30972/eitt.604396>

FÁREZ, Carlos. *Implantación de una Estación Permanente GNSS en el Campus de la Universidad Técnica Particular de Loja* [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. 2010. pp. 48-61. [Consulta: 20 agosto 2022]. Disponible en: <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2467/1/Tesis.pdf>

GARCÍA, David. *Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System)* [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España. 2008. pp. 4-8. [Consulta: 20 mayo 2022]. Disponible en: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>

LÓPEZ, Carolina; & GUZMÁN, Juan. "Sistemas de Navegación Satelital. Desarrollo, Reglamentación Jurídica y Trascendencia en el mundo contemporáneo". *Revista de Derecho Comunicaciones y Nuevas Tecnologías* [en línea], 2014, (Colombia) (12), pp. 4-17. [Consulta: 20 agosto 2022], ISSN 1909-7786. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15425/redecom.12.2014.09>

HENZE, A. *Conectores coaxiales de RF y Microondas para uso en laboratorio [en línea].* Buenos Aires-Argentina: INTI, 2011. [Consulta: 29 junio 2023]. Disponible en: https://radioenlace.es/wp-content/uploads/2018/04/Conectores_rf.pdf

HERNÁNDEZ, R. *Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WI-FI, bandas 2.4 ghz y 5.8 ghz* [En línea](Trabajo de titulación). Universidad de las Américas

Puebla, Puebla, México. 2008. pp. 30-51. [Consulta: 01 julio 2023]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo3.pdf

HERNÁNDEZ, M; et al. *Procesado de Datos GPS: código y fase Algoritmos, Técnicas y Recetas* [en línea]. Barcelona-España: CPET (Centre de Publicacions del Campus Nord, UPC), 2001. [Consulta: 10 septiembre 2022]. Disponible en: http://chapman.upc.es/lectures/legad/docs/LeGAD-00.Book-Spanish_v8.pdf

HERNÁNDEZ, José; & BALCÁZAR, Freddy. *La Red de Estaciones de Monitoreo Satelital GPS REMOS*. Caracas, Venezuela: Mecinca, 2007. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <http://www.mecinca.net/Presentaciones/REMOS.pdf>

HERNANDO, J. *Transmisión por radio*. 6ª ed. Madrid-España: Editorial universitaria Ramón Areces, 2013. ISBN 9788480048569, pp. 223.

HUIDOBRO, J. "Antenas de telecomunicaciones". *Revista Digital de ACTA* [en línea], 2013, (España) (020), pp. 1-2. [Consulta: 22 septiembre 2022]. Disponible en: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/020001.pdf

JAVAD NAVIGATION SYSTEMS. Choke Ring Theory. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.javad.com/>

KEYSIGHT. E5071C ENA Vector Network Analyzee. [Consulta: 10 junio 2023]. Disponible en: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-01423/brochures/5989-5478.pdf>.

KILDAL, Per-Simon. "Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [en línea], 1990, 38(10), pp. 1537-1544. [Consulta: 05 junio 2023]. ISSN 1558-2221. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/8.59765>

KUMAR, A. "Reduce cross-polarization in reflector-type antennas". *MicroWaves & Rf* [en línea], 1978, 17, pp 48-51. [Consulta: 05 abril 2023]. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107919568>

KUNYSZ, Waldemar; & INC NOVATEL. "A Three Dimensional Choke Ring Ground Plane Antenna". *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)* [en línea], 2003, (USA), pp. 1883-1888. [Consulta: 20 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5374>

LEVIN, Richard. et al *Statistics for Management*. 7ª ed. Chennai: Pearson, 2014, pp. 207-264.

Liu et al. 2017. *A Compact High-Precision GNSS Antenna With a Miniaturized Choke Ring*. Changsha : s.n., 2017. págs. 2465-2468.

PÉREZ, Adrián. *Diseño de antenas para estaciones de GPS mediante parametrización de las corrugaciones de choke* [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España. 2016. pp. 20-25. [Consulta: 20 agosto 2022]. Disponible en: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/675128/Perez_Quintana_Adrian_tfg.pdf?sequence=1&isAllowed=y

QUESTIONPRO. *Análisis estadístico: Qué es, usos y cómo realizarlo* [blog]. [Consulta: 20 julio 2023]. Disponible en: <https://www.questionpro.com/blog/es/analisis-estadistico/#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstico%20es%20una,obtener%20informaci%C3%B3n%20significativa%20y%20%C3%BAtil.>

RAMÍREZ, Ramón. *Sistemas de radiocomunicaciones*. Madrid-España: Ediciones Paraninfo, 2015. pág. 78.

ROMERO, M. "Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal". *Revista Enfermería del Trabajo* [en línea], 2016, (España) 6(3), pp. 105-114. [Consulta: 16 julio 2023]. ISSN 2174-2510. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>

SCIRE-SCAPUZZO, F; & MAKAROV, S. "A Low-Multipath Wideband GPS Antenna With Cutoff or Non-Cutoff Corrugated Ground Plane". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [en línea], 2008, (USA) 57(1), pp. 33-46. [Consulta: 20 septiembre 2022]. ISSN 1558-2221. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2008.2009655>

STEINSKOG, D; et al. "A cautionary note on the use of the Kolmogorov-Smirnov test for normality". *American Meteorological Society* [en línea], 2007. (Noruega) 135(3), pp. 1151-1157. [Consulta: 15 julio 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/MWR3326.1>

TRIMBLE. *Antenas geodésicas GNSS de Trimble*. [blog]. [Consulta: 19 agosto 2022]. Disponible en: <http://trimble.com>

U.S. SPACE FORCE. *Space Segment* [blog]. [Consulta: 22 de junio de 2023]. Disponible en: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>.

U-BLOX. *U-blox Serie ANN-MB* [blog]. [Consulta: 15 junio 2023]. Disponible en: <https://www.u-blox.com/en/product/ann-mb-series>

ULPGC. *Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (KS)* [blog]. [Consulta: 10 julio 2023]. Disponible en: https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/5/5015/Complemento_3_Prueba_de_Bondad_de_Ajuste_de_Kolmogorov_Smirnov.pdf

VILLALPOL, María Elena. *Factores que afectan la transmisión* [blog]. [Consulta: 21 agosto 2022]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3883992/>

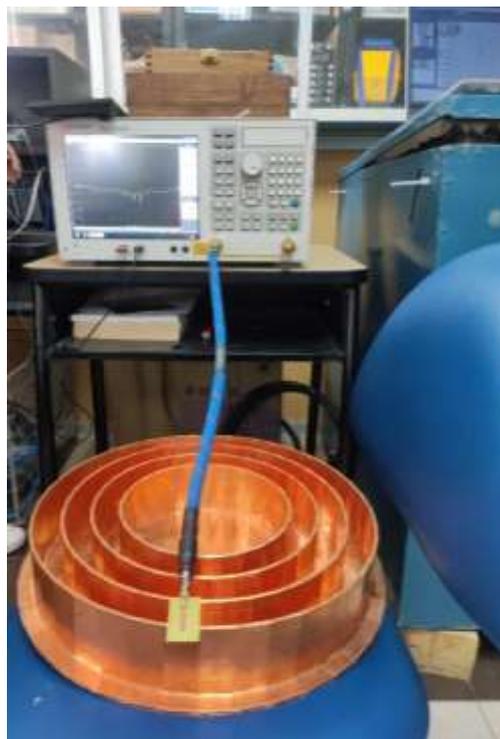
ANEXOS

ANEXO A: MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

- **Parámetro S_{11} Choke Ring con aluminio**



- **Parámetro S_{11} Choke Ring con cobre**

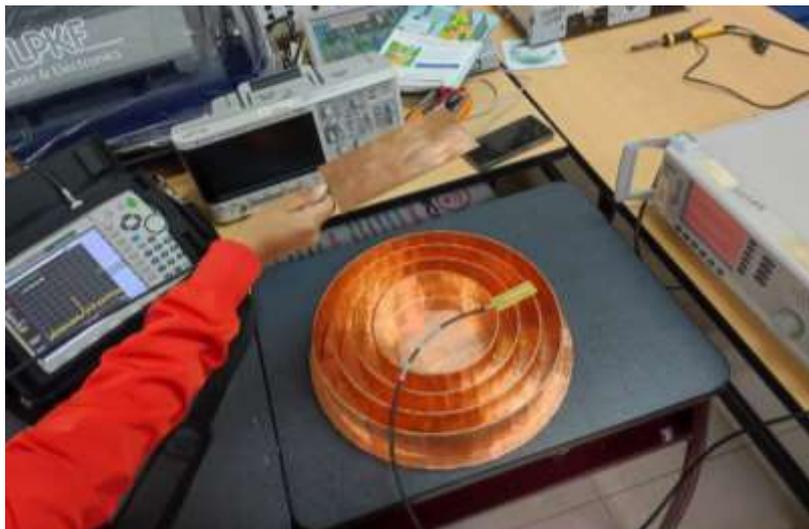


ANEXO B: OBTENCIÓN DE PATRONES DE RADIACIÓN

- Patrón de radiación con Choke Ring de Aluminio



- Patrón de radiación con Choke Ring de Cobre



ANEXO C: MEDICIÓN DEL PERFIL DEL TERRENO

- Toma de datos GNSS para el perfil del terreno



ANEXO D: DATASHEET DE EQUIPOS

- VNA E5071C

PRODUCT BROCHURE

E5071C ENA Vector Network Analyzer

9 kHz to 4.5/6.5/8.5 GHz

100 kHz to 4.5/6.5/8.5 GHz (with bias tees)

300 kHz to 14/20 GHz (with bias tees)

ENA – New Standards in Speed, Accuracy and Versatility

Keysight's E5071C ENA vector network analyzers deliver new standards in speed, accuracy and versatility for RF network analysis. Designed with a wide range of measurement capability to meet multiple network analysis needs, the ENA offers efficiency and flexibility for both manufacturing and R&D applications in industries such as wireless communication, automotive, semiconductor, and medical.



Product discontinuance notice

The E5071C ENA and all associated options will be discontinued, and the last date this product can be ordered is May 31, 2021.

For new product purchases, Keysight recommends the E5080BENA Series Vector Network Analyzer. (2- or 4-ports, up to 53 GHz)

For more information, as well as to access to detailed migration guides, please visit:

www.keysight.com/find/e5080b

 **KEYSIGHT**
TECHNOLOGIES

Key Features

- Wide frequency coverage: 9 kHz to 20 GHz
- Low trace noise: < 0.004 dB rms at 70 kHz IFBW
- Wide dynamic range: > 123 dB
- Fast measurement speed: 9 msec for 401 points with error correction
- High temperature stability: 0.005 dB/°C
- 2 or 4 ports, plus flexible multipoint configuration of up to 22 ports with E5092A
- Built-in VBA programming environment enables high throughput and UI customization
- Powerful analysis and error correction
- Advanced characterization of mixers (such as the vector mixer calibration) and amplifiers with frequency offset mode (optional)
- Advanced characterization of high-speed serial interconnects with enhanced time domain analysis (optional)
- Upgrade are available for all E5071C options at any time



Flexible Test Port Architecture for a Variety of Applications

Select the number of ports, frequency and bias tees to fit your application.

	Number of ports	Frequency range					Option numbers	
		9 MHz	100 kHz	300 kHz	50 MHz	4.5 GHz		6.5 GHz
 <p>2-Port</p>		with bias tees					E5071C-240	
		with bias tees					E5071C-245	
		with bias tees					E5071C-260	
		with bias tees					E5071C-265	
		with bias tees					E5071C-280	
		with bias tees					E5071C-285	
		with bias tees					E5071C-2D5 E5071C-2K5	
 <p>4-Port</p>		with bias tees					E5071C-440	
		with bias tees					E5071C-445	
		with bias tees					E5071C-460	
		with bias tees					E5071C-465	
		with bias tees					E5071C-480	
		with bias tees					E5071C-485 E5071C-4D5 E5071C-4K5	
 <p>22-Port</p>		with bias tees					E5071C-440 or -445 E5092A	
		with bias tees					E5071C-460 or -465 E5092A	
		with bias tees					E5071C-480 or -485 E5092A	
		with bias tees					E5071C-4D5 E5092A	
		with bias tees					E5071C-4K5 E5092A	

Key Specifications



Item	E5071C Option 240/245/440/445	E5071C Option 260/265/460/465	E5071C Option 280/285/480/485	E5071C Option 2D5/4D5	E5071C Option 2K5/4K5	8753ES ³
Test frequency	9 or 100 kHz to 4.5 GHz	9 or 100 kHz to 6.5 GHz	9 or 100 kHz to 8.5 GHz	300 kHz to 14 GHz	300 kHz to 20 GHz	30 kHz to 6 GHz
Source power range ¹	-55 dBm to +10 dBm			-85 dBm to +10 dBm		-85 dBm to +10 dBm
Dynamic range	> 123 dB					110 dB
Trace noise	< 0.004 dBrms					0.006 dBrms
Measurement speed ²	41 ms					848 ms
Stability	0.005 dB/degree C					0.02 dB / degree C
Interface	GPIB/LAN/USB					GPIB
Test port	2- or 4-port					2- or 3-port
Max number of points	20,001					1,601
Max number of channels	160					2
Calibration	SOLT, TRL, Adapter removal/insertion, Unknown thru, ECal, User characterized ECal, SMC, VMC					SOLT, TRL, Adapter Removal
Web-enabled control	Yes					No
Fixture simulator	Yes					No
Built-in programming environment	VBA					No
Future enhancements/upgradeable	Yes					No
Filter tuning limit lines	Yes					Yes
Built-in bias tees	Yes					Yes
Probe power	Yes					Yes
DC measurements	Yes					Yes
Frequency offset mode option	Yes					Yes
Time-domain option	Yes					Yes

1. Maximum output power is changed according to measurement frequency.

2. 1601 points, Full two-port calibration, 1 GHz to 1.2 GHz, IFBW = 500 kHz (E5071C), 6 kHz (8753ES).

3. For more detail, refer to Application Note: 7 Reasons to Upgrade from your 8753 to an ENA Network Analyzer, AN 1478, <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-0206EN.pdf>

For more details, refer to the E5071C ENA Vector Network Analyzer Data Sheet, <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-5479EN.pdf>

- ANRITSU GENERADOR DE SEÑALES MG3692C

Product Brochure

Anritsu Advancing beyond

MG3690C

RF/Microwave Signal Generator
2 GHz to 20/40/50/67 GHz



RoHS Compliant





Key RF Specifications

Parameter	Specification
Frequency Range	2 GHz to 20/40/50/67 GHz
Frequency Resolution	0.01 Hz
Internal Time-Base Stability	< 5 x 10 ⁻¹⁰ /day with Option 16
Frequency Switching (List mode)	2 mSec min
Reference Output Frequency	10 MHz, 1V pk-pk into 50 Ohms
Output Power	-120 dBm to +19 dBm (< 40 GHz output, option 15) -120 dBm to +13 dBm (> 40 GHz, < 50 GHz, option 15) -120 dBm to +3 dBm (> 50 GHz, < 67 GHz, option 15)
Level Accuracy	± 1 dB (< 40GHz output) ± 1.5 dB (< 67 GHz output)
55B Noise Level	-119 dB/Hz (typ) @ 10 GHz output, 10 kHz offset
Harmonics (2 GHz to 20 GHz)	-60 dBc
Non - Harmonics (2 GHz to 20 GHz)	-60 dBc

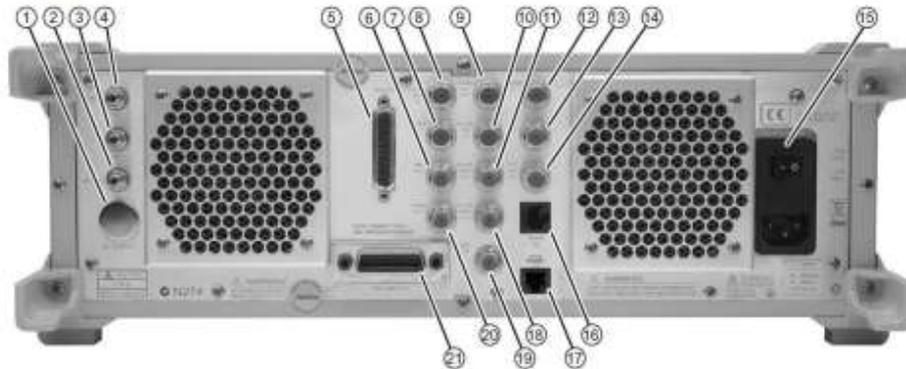
Modulation Specifications

Feature	Specification
FM deviation max	± 100 MHz (Unlocked Wide Mode)
PM deviation max	400 rad (Wide mode)
AM Bandwidth	DC to 100 kHz
AM Depth	0% to 90%
Pulse Modulation On/Off Ratio	80 dB
Pulse Modulation Rise/Fall Times	5 ns (typ)
Pulse Width (min)	< 10 ns (Unleveled)

Front Panel



Rear Panel



Index	Connector Name	Connector Description
1	RF Output (Option 9)	Provides RF output at the rear panel of the instrument.
2	Mixer LO Input (Option 7) +15 VDC (Option 18)	Accepts an external RF input from 1 to 40 GHz (Option 7) or provides a +15 VDC supply (Option 18).
3	Mixer RF Output (Option 7)	Provides an up-converted IF signal from 1 to 40 GHz.
4	Mixer IF Input (Option 7)	Accepts an external IF input from DC to 500 MHz or Scan Modulator Input (Option 20): Accepts 0 VDC to 6 VDC modulating input.
5	AUX I/O	25-pin connector that provides for single cable interface with another MG369xC (master-slave operation) or with other Anritsu instruments such as the Anritsu 56100A Scalar Network Analyzer. Pin 19 also provides a reset function for the Ethernet interface card.
6	AM OUT	Provides a video modulating signal from the internal AM generator. BNC connector.

- ANRITUSU ANALIZADOR DE ESPECTROS MS2724C

Technical Data Sheet



Spectrum Master™

High Performance Handheld Spectrum Analyzer

MS2724C

9 kHz to 20 GHz

Introduction

Anritsu's high performance handheld spectrum analyzer provides the wireless professional the performance needed for the most demanding measurements in harsh RF and physical environments. Whether it is for spectrum monitoring, broadcast proofing, interference analysis, RF and microwave measurements, regulatory compliance, or Wi-Fi and wireless network measurements, the Spectrum Master is the ideal instrument for making fast and reliable measurements.

Spectrum and Interference Analyzer Highlights

- Measure: Occupied Bandwidth, Channel Power, ACPR, C/I
- Interference Analyzer: Spectrogram, Signal Strength, RSSI
- Dynamic Range: > 104 dB in 1 Hz RBW
- DANL: -160 dBm in 1 Hz RBW
- Phase Noise: -100 dBc/Hz @ 10 kHz offset at 1 GHz
- Frequency Accuracy: ±25 ppb with GPS On
- 1 Hz to 10 MHz Resolution Bandwidth (RBW)
- Traces: Normal, Max Hold, Min Hold, Average, # of Averages
- Detectors: Peak, Negative, Sample, Quasi-peak, and true RMS
- Markers: 6, each with a Delta Marker, or 1 Reference with 6 Deltas
- Limit Lines: up to 40 segments with one-button envelope creation
- Trace Save-on-Event: crossing limit line or sweep complete

Capabilities and Functional Highlights

- LTE, TD-LTE
- GSM/EDGE
- W-CDMA/HSPA+
- TD-SCDMA/HSPA+
- CDMA, EV-DO
- Fixed, Mobile WiMAX
- AM/FM/SSB Demodulator
- Zero-span IF Output
- Gated Sweep
- GPS tagging of stored traces
- Internal Pre-amplifier standard
- High Accuracy Power Meter
- 4, 6, 8, 18, 26 GHz USB Sensors
- Channel Scanner
- 8.4 inch Display
- Burst Detect
- < 5 minute warm-up time
- 2.5 hour battery operation time
- Ethernet/USB Data Transfer
- MST Remote Access Tool



Spectrum Master™ MS2724C Spectrum Analyzer
 Handheld Size: 315 mm x 211 mm x 77 mm (12.4 in x 8.3 in x 3.0 in), Lightweight: 3.5 kg (7.8 lb)



Spectrum Analyzer

All specifications and characteristics apply to revision 1 instruments under the following conditions, unless otherwise stated: 1) Instrument within its recommended calibration cycle, 2) After 5 minutes of warm-up time, where the instrument has completely stabilized to the ambient temperature, 3) Internal frequency reference used, 4) Cable analyzer and VNA measurements applicable after standard DSL calibration is performed using Anritsu calibration components, 5) Typical data does not include guard band for measurement uncertainty and temperature variation and is not warranted, 6) All specifications subject to change without notice, 7) Recommended calibration cycle is 12 months.

Measurements	
Smart Measurements	Field Strength (uses antenna calibration tables to measure dBm/m ² , dBW/m ² , V/m, A/m, Watt/m ² , Watt/cm ² , or dBmV/m) Occupied Bandwidth (measures 99 % to 1 % power channel of a signal) Channel Power (measures the total power in a specified bandwidth) ACPR (adjacent channel power ratio) AM/FM/SSB Demodulation (wide/narrow FM, upper/lower SSB), (audio out only) C/I (carrier-to-interference ratio) Emission Mask (recall limit lines as emission mask)
Setup Parameters	
Frequency	Center/Start/Stop, Span, Frequency Step, Signal Standard, Channel #
Amplitude	Reference Level (RL), Scale, Attenuation Auto/Level, RL Offset, Pre-Amp On/Off, Detection
Span	Span, Span Up/Down (1-2-5), Full Span, Zero Span, Last Span
Bandwidth	RBW, Auto RBW, VBW, Auto VBW, RBW/VBW, Span/RBW
File	Save, Recall, Delete, Directory Management
Save/Recall	Setups, Measurements, Limit Lines, Screen Shots JPEG (save only), Save-on-Event
Save-on-Event	Crossing Limit Line, Sweep Complete, Save-then-Stop, Clear All
Delete	Selected File, All Measurements, All Mode Files, All Content
Directory Management	Sort Method (Name/Type/Date), Ascend/Descend, Internal/USB, Copy
Application Options	Impedance (50 Ω, 75 Ω, Other)
Sweep Functions	
Sweep	Single/Continuous, Manual Trigger, Reset, Detection, Minimum Sweep Time, Trigger Type
Sweep Mode	Fast, Performance, No FFT, Burst Detect
Detection	Peak, RMS/Avg, Negative, Sample, Quasi-peak
Triggers	Free Run, External, Video, Delay, Level, Slope, Hysteresis, Holdoff, Force Trigger Once
Trace Functions	
Traces	Up to three Traces (A, B, C), View/Blank, Write/Hold, Trace A/B/C Operations
Trace A Operations	Normal, Max Hold, Min Hold, Average, # of Averages, (always the live trace)
Trace B Operations	A → B, B ↔ C, Max Hold, Min Hold
Trace C Operations	A → C, B ↔ C, Max Hold, Min Hold, A - B → C, B - A → C, Relative Reference (dB), Scale
Marker Functions	
Markers	Markers 1-6 each with a Delta Marker, or Marker 1 Reference with Six Delta Markers, Marker Table (On/Off/Large), All Markers Off
Marker Types	Style (Fixed/Tracking), Noise Marker, Frequency Counter Marker
Marker Auto-Position	Peak Search, Next Peak (Right/Left), Peak Threshold %, Set Marker to Channel, Marker Frequency to Center, Delta Marker to Span, Marker to Reference Level
Marker Table	1-6 markers frequency and amplitude, plus delta markers frequency offset and amplitude
Limit Line Functions	
Limit Lines	Upper/Lower, On/Off, Edit, Move, Envelope, Advanced, Limit Alarm, Default Limit
Limit Line Edit	Frequency, Amplitude, Add Point, Add Vertical, Delete Point, Next Point Left/Right
Limit Line Move	To Current Center Frequency, By dB or Hz, To Marker 1, Offset from Marker 1
Limit Line Envelope	Create Envelope, Update Amplitude, Number of Points (41), Offset, Shape Square/Slope
Limit Line Advanced	Type (Absolute/Relative), Mirror, Save/Recall
Frequency	
Frequency Range	9 kHz to 20 GHz (tunable to 0 Hz), Preamp 100 kHz to 20 GHz
Tuning Resolution	1 Hz
Frequency Reference	Aging: ±1.0 ppm/10 years Accuracy: ±0.3 ppm (25 °C ±25 °C) + aging
Auto-sensing External Frequency Reference	1, 1.2288, 1.544, 2.048, 2.4576, 4.8, 4.9152, 5, 9.8304, 10, 13, 19.6608 MHz
Frequency Span	10 Hz to 20 GHz including zero span
Sweep Time	10 μs to 600 seconds in zero span
Sweep Time Accuracy	±2 % in zero span
Bandwidth (Performance Sweep Mode)	
Resolution Bandwidth (RBW)	1 Hz to 10 MHz in 1-3 sequence ±10 % (-3 dB bandwidth)
Video Bandwidth (VBW)	1 Hz to 10 MHz in 1-3 sequence (-3 dB bandwidth)
RBW with Quasi-Peak Detection	200 Hz, 9 kHz, 120 kHz (-6 dB bandwidth)
VBW with Quasi-Peak Detection	Auto VBW is On, RBW/VBW = 1

- **MOTOROLA MOTO G20**

Motorola Moto G20 ←



Released 2021, June 09
 200g, 9.1mm thickness
 Android 11
 64GB/128GB storage, microSDXC

0.9%
672,007 HITS

38
BECOME A FAN

6.5"
720x1600 pixels

48MP
1080p

4GB RAM
Unisoc T700

5000mAh
Li-Po

HANDS-ON
OPINIONS
COMPARE
PICTURES

NETWORK	Technology	GSM / HSPA / LTE	EDITING ▼
LAUNCH	Announced	2021, April 26	
	Status	Available, Released 2021, June 09	
BODY	Dimensions	165.2 x 75.7 x 9.1 mm (6.50 x 2.98 x 0.36 in)	
	Weight	200 g (7.05 oz)	
	Build	Glass front, plastic frame, plastic back	
	SIM	Single SIM (Nano-SIM) or Hybrid Dual SIM (Nano-SIM, dual stand-by) Water-repellent design	
DISPLAY	Type	IPS LCD, 90Hz	
	Size	6.5 inches, 102.0 cm ² (~81.6% screen-to-body ratio)	
	Resolution	720 x 1600 pixels, 20:9 ratio (~270 ppi density)	
PLATFORM	OS	Android 11	
	Chipset	Unisoc T700	
	CPU	Octa-core 1.8 GHz	
	GPU	Mali G52	
MEMORY	Card slot	microSDXC (uses shared SIM slot)	
	Internal	64GB 4GB RAM, 128GB 4GB RAM	
MAIN CAMERA	Quad	48 MP, f/1.7, (wide), 1/2.0", 0.8µm, PDAF	
		8 MP, f/2.2, 118° (ultrawide), 1/4.0", 1.12µm	
		2 MP, f/2.4, (macro)	
		2 MP, f/2.4, (depth)	
Features	LED flash, HDR, panorama		
Video	1080p@30fps		
SELFIE CAMERA	Single	13 MP, f/2.2, (wide), 1/3.1", 1.12µm	
	Features	HDR	
	Video	1080p@30fps	
SOUND	Loudspeaker	Yes	
	3.5mm jack	Yes	
COMMS	WLAN	Wi-Fi 802.11 a/b/g/n/ac, dual-band, Wi-Fi Direct	
	Bluetooth	5.0, A2DP, LE	
	Positioning	GPS, GLONASS, GALILEO	
	NFC	Yes	
	Radio	FM radio	
	USB	USB Type-C 2.0	
FEATURES	Sensors	Fingerprint (rear-mounted), accelerometer, gyro, proximity	
BATTERY	Type	Li-Po 5000 mAh, non-removable	
	Charging	10W wired	
MISC	Colors	Breeze Blue, Flamingo Pink	
	Models	XT2128-1, XT2128-2	
	Price	About 160 EUR	

- **XIAOMI 11 LITE 5G**

Xiaomi Mi 11 Lite 5G ←



Released 2021, April 16
 159g, 6.8mm thickness
 <> Android 11, MIUI 13
 64GB/128GB/256GB storage, microSDXC

4.7%
3,034,413 HITS

409
BECOME A FAN

6.55"
1080x2400 pixels

64MP
2160p

6/8GB RAM
Snapdragon 780G

4250mAh
Li-Po

👁️ REVIEW
💬 OPINIONS
🔄 COMPARE
🖼️ PICTURES
💰 PRICES

Not to be confused with Xiaomi Mi 11 Lite. Also known as Xiaomi Mi 11 Youth

NETWORK	Technology	GSM / CDMA / HSPA / EVDO / LTE / 5G	EXPAND ▾
LAUNCH	Announced	2021, March 29	
	Status	Available. Released 2021, April 16	
BODY	Dimensions	160.5 x 75.7 x 6.8 mm (6.32 x 2.98 x 0.27 in)	
	Weight	159 g (5.61 oz)	
	Build	Glass front (Gorilla Glass 6), glass back	
	SIM	Hybrid Dual SIM (Nano-SIM, dual stand-by) IP53, dust and splash resistant	
DISPLAY	Type	AMOLED, 1B colors, HDR10+, 90Hz, 500 nits (typ), 800 nits	
	Size	6.55 inches, 103.6 cm ² (~85.3% screen-to-body ratio)	
	Resolution	1080 x 2400 pixels, 20:9 ratio (~402 ppi density)	
	Protection	Corning Gorilla Glass 6	
PLATFORM	OS	Android 11, MIUI 13	
	Chipset	Qualcomm SM7350-AB Snapdragon 780G (5 nm)	
	CPU	Octa-core (1x2.4 GHz Kryo 670 & 3x2.2 GHz Kryo 670 & 4x1.90 GHz Kryo 670)	
	GPU	Adreno 642	
MEMORY	Card slot	microSDXC (uses shared SIM slot)	
	Internal	64GB 6GB RAM, 128GB 6GB RAM, 128GB 8GB RAM, 256GB 8GB RAM UFS 2.2	
MAIN CAMERA	Triple	64 MP, f/1.8, 26mm (wide), 1/1.97", 0.7µm, PDAF	
		8 MP, f/2.2, 119° (ultrawide), 1/4.0", 1.12µm	
		5 MP, f/2.4, (macro), AF	
	Features	Dual-LED dual-tone flash, HDR, panorama	
	Video	4K@30fps, 1080p@30/60/120fps; gyro-EIS	
SELFIE CAMERA	Single	20 MP, f/2.2, 27mm (wide), 1/3.4", 0.8µm	
		Features	HDR, panorama
		Video	1080p@30/60fps, 720p@120fps

ANEXO E: FICHA DE ESTACIÓN PERMANENTE EREC-EERSA



I N S T I T U T O
Geográfico Militar



Ficha de Estación Permanente - REGME

junio-2020

Situación:

Código.....:	EREC	Cantón: Riobamba
Nombre.....:	Riobamba (EERSA)	
Código IERS:	42037M001	Provincia: Chimborazo
Instalación...:	14-Jun-2013	

Localización.: Terraza del edificio antiguo de la Empresa Eléctrica de Riobamba S.A.

Construcción: Columna de hormigón de 3 m de altura. Sobre esta se ubica el centrado forzozo (CF-IGM-v2) en el cual se encuentra la antena.

Coordenadas ITRF2008:

Latitud.....:	1° 40' 16.2199" S	X.....:	1255116.444 m.
Longitud.....:	78° 39' 04.3953" W	Y.....:	-6253531.737 m.
Altitud elipsoidal:	2801.348 m.	Z.....:	-184844.678 m.
Este UTM.....:	761323.453 m.	Altitud sobre el nivel medio del mar:	
Norte UTM.....:	9815128.634 m.	Época de referencia:	2016.4
Zona.....:	17 Sur		

Instrumentación:

Receptor: TRIMBLE NET R9
Antena: TRM55971.00 NONE **Altura:** 0.0000 m. (BPA)

Esquema antena



Información adicional:

Esta estación permanente, además de a la red REGME, pertenece a la siguiente red:

- Red SIRGAS Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas:
<http://www.sirgas.org/es/>

Datos diarios crudos a 1 segundo y rinex a 30 segundos:
<http://www.eersa.com.ec/site/>

Emite correcciones diferenciales a través del Caster:
Principal: <http://regme-ip.igm.gob.ec:2101>
Backup: <http://regme-ip.espoch.ec:2101>

E-mail de contacto EERSA: fyanez@eersa.com.ec

Coordenadas oficiales hasta el 15 de abril 2016:

ITRF94 - SIRGAS95

Latitud.....:	1° 40' 16.2199" S
Longitud.....:	78° 39' 04.3950" W
Altitud elipsoidal.....:	2801.366 m.
Época de referencia.....:	1995.4



Observaciones:

Más información de esta estación permanente:

<ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/DGF/station/log>



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 21/08/2023

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES	
Nombres – Apellidos: Esthefanny Vanessa Bonilla Jara	
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL	
Facultad: Informática y Electrónica	
Carrera: Telecomunicaciones	
Título a optar: Ingeniera en Telecomunicaciones	
f. Analista de Biblioteca responsable:	 Ing. Fernanda Arévalo M.

