

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Caracterización del canal inalámbrico de un sistema LoRa aplicado
a parcelas de maíz

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Presentado por:

Jonathan Adrián Arreaga Miranda

Aileen Tamara Rodhen López

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres, quienes me han influenciado en todos los aspectos de mi vida con sus consejos y valores, los cuales día a día me motivaron a superarme y cumplir mis metas. Estos son los frutos que hemos cosechado en conjunto, padres, y deseo que sigamos sembrando muchos más.

**Jonathan Adrián Arreaga
Miranda**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres y hermanas quienes, con su paciencia y sacrificio, me brindaron en todo momento su apoyo incondicional y me guiaron por el buen camino. A mis maestros, quienes siempre se esforzaban en dar todo de sí al momento de impartir sus conocimientos.

**Jonathan Adrián Arreaga
Miranda**

AGRADECIMIENTOS

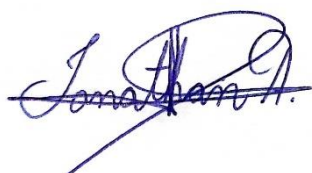
Mi más sincero agradecimiento a mi mamá por la confianza incondicional, a mi papá por el gran esfuerzo de apoyarnos, a mi hermana por las incontables veces que me brindó su ayuda y a mi hermano por siempre alegrarme, sobre todo, en los días difíciles.

A mis amigos, que hicieron de mi experiencia en la universidad lo mejor que me ha pasado y con quienes nos vimos crecer académica y personalmente: “Incluso si todos estamos en diferentes lugares, nuestros vínculos serán eternos”.

Aileen Tamara Rodhen López

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jonathan Adrián Arreaga Miranda* y *Aileen Tamara Rodhen López* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Jonathan Adrián
Arreaga Miranda



Aileen Tamara Rodhen
López

EVALUADORES

Jorge Brito C.

M.Sc. Jorge Brito Collantes

PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:
**BORIS GABRIEL
RAMOS SANCHEZ**

Ph.D Boris Ramos Sánchez

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

ESPOL cuenta con una granja experimental que necesita monitoreo para mejorar el plan de riego y reducir costos energéticos. Para garantizar un diseño eficiente de red de sensores inalámbricos se deben conocer las características de propagación de la señal en el medio. Este trabajo propone el uso de modelos de propagación de múltiples gradientes, correlación de Pearson y zonas de Fresnel para el análisis de obstrucciones y el comportamiento de la señal en parcelas de maíz en la granja. Se usaron nodos sensores para mediciones de RSSI a 3 diferentes alturas (0.5, 1 y 2 [m]) y 4 trayectorias empleando LoRa como tecnología de comunicación. Mediante estaciones meteorológicas se registraron datos de parámetros de cultivo y ambientales. Del estudio resultó que a mayor altura mejoraba la cobertura de la señal siempre que no existiera obstrucción considerable por concreto, árboles o terreno. Parámetros como la temperatura, humedad del ambiente, radiación solar y presión atmosférica no parecen incidir en los valores de RSSI a alturas más alejadas del suelo. No obstante, en las proximidades del suelo se notó una aparente relación (de carácter débil), por lo que es recomendable un estudio más profundo sobre este tema. Para caracterizar una zona agrícola real hacen falta más de dos gradientes para verdaderamente entender el comportamiento de la señal y la atenuación que sufre a lo largo de la zona.

Palabras Clave: canal inalámbrico, modelo de propagación, LoRa, agricultura moderna, RSSI.

ABSTRACT

ESPOL has an experimental farm that needs monitoring to improve the irrigation plan and reduce energy costs. To ensure an efficient design of wireless sensors network, the characteristics of signal propagation in the area should be known. This study proposes the use of multiple gradient propagation models, Pearson correlation and Fresnel zone for the analysis of obstructions and signal behavior in corn fields inside the farm. Sensor nodes were used for RSSI measurements at 3 different heights (0.5, 1 and 2 [m]) and 4 pathways using LoRa as communication technology. By using meteorological stations, crop and environmental parameters were sensed. The study showed that higher elevation improved signal coverage when there was no significant concrete, trees or ground obstruction. Parameters such as temperature, humidity of the environment, solar radiation and atmospheric pressure do not appear to affect RSSI values at heights farther from the ground. However, nearby the ground, an apparent relationship (of a weak character) was noted, so a more in-depth study on this topic is advisable. To characterize a real agricultural area, it takes more than two gradients to truly understand the behavior of the signal and the attenuation it undergoes throughout the area.

Keywords: Wireless channel, propagation model, LoRa, modern agriculture, RSSI.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
INDICE GENERAL.....	III
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
CAPITULO 1.....	1
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Radiotransmisión.....	5
1.4.2 Mecanismos de propagación.....	5
1.4.3 Propagación de señales en RF.....	7
1.4.4 Redes de Sensores Inalámbricos.....	9
1.4.5 Coeficiente de correlación de Pearson.....	10
1.5 Estado del Arte.....	10
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 Planteamiento de la solución.....	15
2.2 Especificaciones del Sistema LoRaWAN.....	16
2.3 Descripción técnica de equipos y componentes.....	17
2.4 Fases del desarrollo de la solución.....	22
2.4.1 Plan de distribución de sensores.....	22
2.4.2 Toma de datos RSSI.....	24
2.4.3 Toma de datos de parámetros ambientales y de cultivo.....	25
2.4.4 Filtrado y procesamiento de datos.....	26
2.4.5 Entregables.....	27
2.5 Descripción de cálculos adicionales.....	28

2.5.1	Cálculo de porcentaje de obstrucción en Zona de Fresnel y atenuaciones/pérdida de paso.....	28
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	29
3.1	Zonas de Fresnel y correlación.....	29
3.1.1	Altura del nodo: 0.5 [m].....	29
3.1.2	Altura del nodo: 1 [m].....	33
3.1.3	Altura del nodo: 2 [m].....	34
3.2	Modelos de propagación en base a múltiples gradientes para 3 alturas diferentes.....	35
3.2.1	Altura de nodos a 0.5 [m].....	36
3.2.2	Altura de nodos a 1 [m].....	38
3.2.3	Altura de nodos a 2 [m].....	40
3.3	Análisis de costos.....	42
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
4.1	Conclusiones.....	44
4.2	Recomendaciones.....	48
	BIBLIOGRAFIA.....	2
	APÉNDICES.....	5

ABREVIATURAS

PIB	Producto Interno Bruto
GEA	Granja Experimental Agrícola
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FADCOM	Facultad de Arte, Diseño y Comunicación
WSN	Wireless Sensors Network
RSSI	Received Signal Strength Indicator

SIMBOLOGÍA

KHz	Kilohercios
MHz	Megahercios
GHz	Gigahercios
dB	Decibelios
dBm	Decibelios milimétricos
dBi	Decibelios isotrópicos
bps	Bits por segundo
V	Voltio
mA	Miliamperio
m	Metro
Km	Kilómetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Zonas de Fresnel [4]	6
Figura 2.1 Diagrama de bloques de la solución propuesta	15
Figura 2.2 Gateway LoRa Heltec módulo HT-M01 [26]	17
Figura 2.3 Placa de desarrollo Heltec HTCC-AB02 [27].....	18
Figura 2.4 Circuito de reloj modelo DS1307 [28].....	19
Figura 2.5 Raspberry Pi Zero [29].....	19
Figura 2.6 Raspberry Pi [30]	20
Figura 2.7 Router Nebula 1200-AC [31].....	21
Figura 2.8 Despliegue de nodos sensores y Gateway (Datos RSSI) - vista superior	22
Figura 2.9 Estado del cultivo durante la toma de datos RSSI.....	24
Figura 2.10 Ubicación de las Estaciones Meteorológicas dentro del Campus Gustavo Galindo de la ESPOL.....	25
Figura 2.11 Datos RSSI del nodo MA-21 a 1 metros de altura	26
Figura 2.12 Parámetros de cultivo de la Estación meteorológica en GEA.....	26
Figura 2.13 Parámetros de cultivo de la Estación meteorológica en bloque de Tecnologías	27
Figura 2.14 Perfil de elevación Radial A	5
Figura 2.15 Perfil de elevación Radial B	5
Figura 2.16 Perfil de elevación Radial C	5
Figura 2.17 Perfil de elevación Radial LOS.....	6
Figura 3.1 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MA-28, altura de 0.5 [m] 29	
Figura 3.2 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MB-28, altura de 0.5 [m]	30
Figura 3.3 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MC-28, altura de 0.5 [m]	31
Figura 3.4 Modelo de propagación de múltiples gradientes con altura de nodos de 0.5 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	36

Figura 3.5 Segmento del modelo de propagación en zona de cultivo con altura de nodos de 0.5 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	37
Figura 3.6 Modelo de propagación de múltiples gradientes con altura de nodos de 1 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	38
Figura 3.7 Segmento del modelo de propagación en zona de cultivo con altura de nodos de 1 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	38
Figura 3.8 Modelo de propagación (2021) de múltiples gradientes con altura de nodos de 1 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	39
Figura 3.9 Modelo de propagación de múltiples gradientes con altura de nodos de 2 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	40
Figura 3.10 Segmento del modelo de propagación en zona de cultivo con altura de nodos de 2 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).	41
Figura 3.11 Mapa de distribución de nodos y obstrucciones en zonas analizadas de GEA-ESPOL.....	7
Figura 3.12 Mapa de distribución (2021) de nodos y obstrucciones en zonas analizadas de GEA-ESPOL	8
Figura 3.13 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MA-28, altura de 1 [m]	8
Figura 3.14 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MB-28, altura de 1 [m]	9
Figura 3.15 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MC-28, altura de 1 [m]	9
Figura 3.16 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MA-28, altura de 2 [m]	10
Figura 3.17 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MB-28, altura de 2 [m]	10

Figura 3.18 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MC-28, altura de 2 [m]
..... 11

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Especificaciones del sistema LoRaWAN	17
Tabla 2.2 Especificaciones de Heltec HT-M01 [26].....	18
Tabla 2.3 Especificaciones del Heltec HTCC-AB02 [27]	18
Tabla 2.4 Especificaciones del módulo DS1307 [28]	19
Tabla 2.5 Especificaciones del Raspberry Pi Zero [29]	20
Tabla 2.6 Especificaciones de Raspberry Pi [30]	21
Tabla 2.7 Especificaciones de Router Nebula 1200-AC [31].....	21
Tabla 2. 8 Coordenadas de Nodos en Maíz – Datos RSSI.....	6
Tabla 2.9 Cronograma de toma de datos RSSI.....	6
Tabla 3.1 Correlaciones promedio y porcentajes de nodos por tipo de relación para parámetros de cultivo en enlace de subida y bajada a 0.5 [m]	33
Tabla 3.2 Correlaciones promedio y porcentajes de nodos por tipo de relación para parámetros de cultivo en enlace de subida y bajada a 1 [m].....	34
Tabla 3.3 Correlaciones promedio y porcentajes de nodos por tipo de relación para parámetros de cultivo en enlace de subida y bajada a 2 [m].....	35
Tabla 3.4 Tabulación de gradientes por planificación, zonas sin y con cultivo y enlaces	42
Tabla 3.5 Detalle de componentes y precios para el sistema de comunicación LoRaWAN.....	43
Tabla 3.6 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros de cultivo para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA para una altura del nodo de 0.5 [m]	12
Tabla 3.7 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros de cultivo para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA para una altura del nodo de 1 [m]	13
Tabla 3.8 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros de cultivo para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA para una altura del nodo de 2 [m]	14
Tabla 3.9 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros ambientales para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de Tecnologías para una altura del nodo de 0.5 [m]	15

Tabla 3.10 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros ambientales para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de Tecnologías para una altura del nodo de 1 [m]	16
Tabla 3.11 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros ambientales para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de Tecnologías para una altura del nodo de 2 [m]	18
Tabla 3.12 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria AB a 1 [m]	19
Tabla 3.13 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria LOS a 1 [m]	19
Tabla 3.14 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria A a 0.5 [m]	20
Tabla 3.15 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria A a 1 [m]	20
Tabla 3.16 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria A a 2 [m]	21
Tabla 3.17 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria B a 0.5 [m]	21
Tabla 3.18 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria B a 1 [m]	22
Tabla 3.19 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria B a 2 [m]	22
Tabla 3.20 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria C a 0.5 [m]	23
Tabla 3.21 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria C a 1 [m]	24
Tabla 3.22 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria C a 2 [m]	24

CAPITULO 1

1. INTRODUCCION

Se conoce que una de las principales fuentes de ingresos del Ecuador proviene del sector agrícola, que es considerado como el cuarto sector económico más importante del país junto con la ganadería, silvicultura y pesca, aportando por sí solo el 0,1% en el PIB nacional. [1]

A pesar de esto, la estructura para el desarrollo agrícola siempre se ha encontrado en la precariedad debido al escaso o bajo presupuesto para investigación y avance tecnológico, dificultando así, la transformación del sistema agroindustrial, el fomento de la innovación y capacidades humanas para el planteamiento de soluciones inteligentes y progreso de este sector. [2]

Según la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), durante el 2014-2018, los cultivos permanentes producidos y de mayor extensión corresponden a caña de azúcar, banano, arroz, maíz duro seco, entre otros. Los cultivos de maíz para producción de grano seco duro representan el 6% en ocupación de territorio según este estudio. [2]

Las principales causas de pérdidas considerables de cultivo son: efectos meteorológicos, exceso o carencia de riegos, sequías, heladas, plagas, etc. [2]. Por esto, es necesario el buen uso y control del agua mediante la implementación de soluciones que permitan también precautelar la producción, abaratar costos de mantenimiento y mejorar la calidad del producto.

El riego tecnificado es una de estas soluciones y hace uso de la tecnología para la mejora de procesos de producción. Aun así, existen otras metodologías

aplicadas en países desarrollados a nivel mundial dentro de la denominada Agricultura Moderna como lo son las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).

Al involucrar dispositivos que se comunican inalámbricamente para el intercambio de datos, resulta indispensable la caracterización del canal de la zona agrícola específica. Con un análisis más claro de la propagación de las señales, basado en mediciones de potencia y atenuación, se puede rediseñar y optimizar una red a favor del desarrollo del cultivo y la producción.

1.1 Descripción del problema

La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) cuenta con una Granja Experimental Agrícola (GEA) ubicada en el Campus Gustavo Galindo, vía Perimetral en Guayaquil, Ecuador. La misma que corresponde a un espacio donde estudiantes e investigadores realizan pruebas prácticas en el campo de la agricultura y áreas técnicas afines.

Dentro de GEA se cultivan diferentes tipos de productos, como: cacao, maíz, plátano, café, etc.; por lo que en este centro de investigación también se fomenta el estudio y avance del riego tecnificado para optimizar la irrigación. El agua para el riego proviene del lago de FADCOM que, mediante bombeo, es transportada a un estanque ubicado dentro de la granja, representando así, un consumo energético considerable.

Por esto, es imprescindible el control de este recurso y puede realizarse mediante el despliegue de una red de sensores que satisfaga las necesidades de monitoreo del cultivo experimental por parcelas que se realiza. Esto conlleva a disponer de un sistema de comunicación para la transmisión de datos sin que se sufran constantes intermitencias en la señal y se pierda información valiosa.

Al ser una zona agrícola, existen muchos factores que pueden afectar el canal de comunicación (medio inalámbrico), como, por ejemplo: las irregularidades del terreno, densidad de las plantaciones y vegetación alrededor, etapas del crecimiento

de los cultivos, estaciones climáticas a lo largo del año, entre otros; que provocan variaciones en la intensidad de potencia recibida de las señales de comunicación.

1.2 Justificación del problema

El mal uso del recurso hídrico afecta directamente el ambiente en el que se desarrollan los cultivos, por lo que los sistemas de riego tecnificado representan una solución para precautelar y mejorar la producción además de reducir costos de mantenimiento.

Una de las tecnologías más usadas dentro de la agricultura moderna para la tecnificación del riego son las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), que se componen de nodos sensores para el monitoreo en tiempo real y permiten la toma de decisiones inmediatas de acuerdo al estado de un cultivo o zona específica.

Estas redes dependen del medio inalámbrico donde se propagan las señales, el cual es sensible a diferentes variables como: el tipo y densidad del cultivo, parámetros ambientales y de plantaciones, estación climática, entre otros. Así, se sustenta el requerimiento de un buen estudio del canal donde se evalúe el efecto de dichas variables sobre la señal de información.

Con esta caracterización se puede mejorar el análisis de las variaciones en la intensidad de la señal y diseñar un óptimo despliegue de sensores que garantizará la precisión en lecturas de condiciones de los cultivos. Además, también se lograría manejar de mejor manera el control de riego, evitando exceso en gasto energético por bombeo y costos de operación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Caracterizar el canal inalámbrico en parcelas de maíz de la Granja Experimental Agrícola (GEA-ESPOL) a través del análisis de múltiples gradientes e influencia de parámetros ambientales sobre la atenuación de la señal para optimización de futuras aplicaciones en agricultura de precisión.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar la primera zona de Fresnel para la comprensión del comportamiento de enlaces en base a los siguientes parámetros:
 - a. Porcentajes y tipo de obstrucción.
 - b. Pérdida de paso/Atenuación.
- Desarrollar modelos de propagación de múltiples gradientes para estimar la cobertura del sistema variando los siguientes parámetros de medición:
 - a. Altura de las antenas de los nodos.
 - b. Período climático en la granja.
- Determinar el efecto sobre la señal recibida de los siguientes parámetros:
 - a. Humedad del cultivo.
 - b. Temperatura del cultivo.
 - c. Otros parámetros ambientales.

1.4 Marco teórico

En esta sección se revisarán conceptos necesarios para facilitar el entendimiento y posterior desarrollo del proyecto, también se incluyen casos de estudio y trabajos similares realizados anteriormente.

1.4.1 Radiotransmisión

La transmisión inalámbrica surge ante la necesidad de comunicar dispositivos sin utilizar un medio o infraestructura física que los conecte entre sí, como son los cables coaxiales, fibra óptica, entre otros. [3]

Las ondas de radio frecuencia son ampliamente usadas en transmisiones inalámbricas gracias a su capacidad de establecer enlaces de larga distancia y propagarse en todas las direcciones, por lo que no requieren de alineación entre el transmisor y receptor. [3]

Presentan una relación inversa entre la potencia recibida con respecto a la distancia debido a un factor de atenuación llamado **pérdida por trayectoria**. A bajas frecuencias las ondas RF pueden atravesar objetos, pero la potencia se reduce de acuerdo al inverso del cuadrado de la distancia ($1/r^2$). En altas frecuencias, la pérdida por trayectoria aumenta considerablemente, por lo que se suele aprovechar la **reflexión de ondas** para mejorar la potencia recibida. [3]

1.4.2 Mecanismos de propagación

Estos mecanismos describen los fenómenos reales que intervienen en la propagación de señales y provocan variaciones en los parámetros de las mismas.

En la **reflexión, refracción y transmisión** se considera que el comportamiento de una señal se comporta como un rayo cuando incide sobre otro medio (sólo se presenta en superficies lisas). Parte de las componentes eléctricas/magnéticas de la señal se reflejan y otra parte se transmite (señal refractada) según el medio atravesado. [4]

En la **dispersión en superficies ásperas** se considera la diferencia de altura que hay entre puntos de la superficie para el cálculo de las diferentes fases en la onda

reflejada, provocado por un efecto de dispersión en la onda incidente y que, por consiguiente, resulta en una dispersión de energía especular. [4]

La **difracción** se da cuando la trayectoria de transmisión se encuentra obstaculizada, generando una zona de sombra en la que existe propagación de energía. El efecto de **filo de cuchillo**, explica que la energía difractada desde el borde del obstáculo se presenta en forma de rayos incidentes hacia la zona de sombra. [4]

Este efecto se puede definir de acuerdo con la obstrucción de las zonas de Fresnel, que son elipsoides formados cuando la distancias $(a + b)$ superan la suma directa $(d_1 + d_2)$, tal como se aprecia en la Figura 1.1.

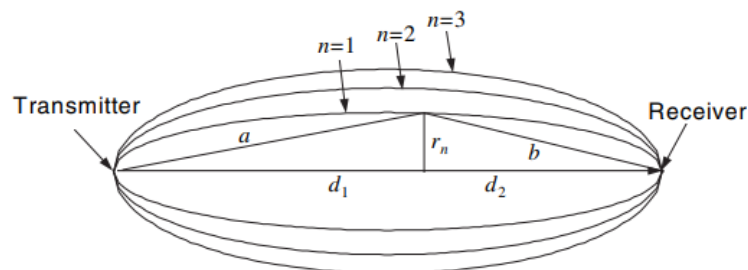


Figura 1.1 Zonas de Fresnel [4]

Si se asume que $r_n \ll d_1$ y $r_n \ll d_2$ es posible aproximar las zonas de Fresnel:

$$r_n \approx \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1.1)$$

Debido a la ecuación

(1.1) se define un criterio para que la pérdida por obstrucción sea 0 dB, que consiste en que el 60% de la primera zona de Fresnel no se encuentre obstruida. [4]

1.4.3 Propagación de señales en RF

Se describen los siguientes parámetros que intervienen en las comunicaciones en base a radio frecuencia RF.

1.1.1.1 Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE o EIRP)

El *EIRP* indica la potencia total que sale realmente desde un transmisor [5], y se mide de acuerdo a la ecuación (1.2).

$$EIRP = P_{Tx} + G_{Tx} - L_{Tx} \quad (1.2)$$

donde

- P_{Tx} es la potencia de transmisión en dBW o dBm.
- G_{Tx} es la ganancia de la antena transmisora en dB.
- L_{Tx} llamada pérdida feeder es la pérdida asociada a cables de alimentación en el transmisor en dB.

Dentro de la propagación de señales las potencias se miden en dBm, dBW y las ganancias y pérdidas, en dB. [6]

1.1.1.2 Pérdida de paso

La pérdida de paso es el conjunto de atenuaciones que se producen sobre la señal al propagarse. Se compone de la pérdida de espacio libre o FSL, pérdidas atmosféricas y otras que puedan presentarse en los enlaces [6]. La pérdida de espacio libre se calcula por la ecuación de Friss y se muestra en la ecuación (1.3) o en su escala logarítmica, en ecuación (1.4).

$$L = G_{Tx}G_{Rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1.3)$$

$$L_{[dB]} = -G_{Tx[dB]} - G_{Rx[dB]} - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) + 22 \quad (1.4)$$

Generalmente, las ganancias del transmisor y el receptor no se consideran en el cálculo de la pérdida, por lo que la expresión resultaría como en la ecuación (1.5).

$$L_{FSL[dB]} = -20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (1.5)$$

1.1.1.3 Modelamiento de pérdida de paso y potencia recibida

Dentro del campo experimental de las transmisiones inalámbricas de radiofrecuencia destaca el modelamiento de pérdidas de paso en entornos específicos, lo cual permite determinar cobertura aproximada de señal útil para los radioenlaces [6].

Una técnica muy empleada para diseño de modelos es el gradiente-potencia, el cual se calcula en base al modelo estadístico del gradiente [7], definido por la ecuación (1.6).

$$L_p[dB] = L_0[dB] + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + F_\sigma[dB] \quad (1.6)$$

donde

- α es un coeficiente de atenuación calculado de la recta de regresión lineal entre la potencia recibida respecto a la distancia.
- d_0 es una distancia de referencia arbitraria en metros.
- F_σ es el margen de debilitamiento asociado a una distribución Gaussiana de margen 0 en dB.

$L_0(dB)$ se calcula según la ecuación (1.7)

$$L_0(dB) = -10\log G_{Tx}G_{Rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \quad (1.7)$$

De igual manera es posible determinar la potencia recibida en base a la ecuación (1.8).

$$P_{r[dBm]}(d) = P_{r[dBm]}(d_0) - 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + F_{\sigma[dB]} \quad (1.8)$$

1.4.4 Redes de Sensores Inalámbricos

Es aquella red conformada por equipos llamados nodos que recogen y procesan datos del entorno, se comunican entre sí o hacia un nodo central de manera inalámbrica. Se caracterizan por su bajo costo de implementación y consumo energético además de fácil configuración y despliegue. [8]

Suelen aplicarse en el sector ambiental, industrial, agrícola y militar, enfocándose en monitoreo y automatización de procesos gracias a su adaptabilidad en entornos complejos [9]. Respecto a la arquitectura de red, la estructura básica de una WSN está compuesta de nodos inalámbricos, puertas de enlace y estaciones bases. [8]

Los **nodos inalámbricos** son dispositivos electrónicos que recogen datos del entorno para procesarlos y transmitirlos hacia un destino. Los nodos inalámbricos están pensados para trabajar en conjunto con otros nodos dentro de una red. [8]

La **puerta de enlace** o **Gateway** cumple la función de interconectar la WSN con la red de datos. Las WSN requiere trabajar en conjunto a otro tipo de red (LAN, Internet) que permita al usuario acceder a la información recolectada por los nodos. [8]

La **estación base** suele ser un equipo servidor en donde se almacenan las bases de datos y los usuarios tienen acceso de manera presencial o remota. [8]

1.4.5 Coeficiente de correlación de Pearson

Es una unidad de medida que pretende determinar el nivel de relación lineal entre dos variables cuantitativas. Este factor medido entre 0 y ± 1 determina que tan fuerte es la dependencia de comportamiento, cuyos rangos indican están claramente definidos.

Entre > 0 y ± 0.2 indica correlación nula, entre ± 0.2 y ± 0.4 existe una correlación débil, entre ± 0.4 y ± 0.6 hay correlación moderada, entre ± 0.6 y ± 0.8 existe una correlación fuerte y, entre ± 0.8 y $< \pm 1$ existe una correlación muy fuerte. De igual manera, para los valores de coeficiente 0 y 1 la correlación es nula y perfecta, respectivamente. [10]

1.5 Estado del Arte

El estudio, diseño e implementación de redes de sensores inalámbricos es común en países desarrollados para aplicaciones de agricultura moderna, específicamente en Agricultura de Precisión. Esta, busca integrar nuevas tecnologías con la industria agrícola para automatización del procesamiento y análisis de información relacionada a cultivos y agilizar tiempos de respuesta y acciones a tomar. [11]

En Ecuador aún no se ha explotado esta herramienta en campos agrícolas a pesar de que es una de las mayores fuentes de producción y trabajo en nuestro país para pequeños y medianos productores.

El mal uso del agua dulce del planeta motivó a investigadores de la Lovely Professional University (LPU) en India y Duy Tan University en Vietnam, a desarrollar una investigación sobre la agricultura urbana inteligente en base a tecnología LoRa

[12]. Mediante los datos recolectados por una estación meteorológica, determinaron la influencia del clima y del suelo para programar un sistema de riego de acuerdo a cómo variaban dichos parámetros.

En la ciudad de Dongying en China, se usó la tecnología LoRa para implementar un sistema de servicio mediante una red de sensores inalámbricos (temperatura, humedad, concentración de dióxido de carbono, etc.), en cultivos de pitahaya dentro de un cobertizo. El análisis de datos se realizó por medio de un diseño experimental de monitoreo basado en LoRa. [13]

Otras investigaciones sobre características de propagación han utilizado tecnologías como la banda de 2.4GHz (WiFi). Un proyecto realizado en China estudió dichas características en cultivos de maíz considerando altura de antenas, espaciamiento entre plantas, diámetro del tallo, madurez del cultivo, entre otros. Sin embargo, no se consideraron aspectos como irregularidades del terreno y edificaciones dentro del cultivo. [14]

Investigadores de la Universidad de Deakin en Australia se concentraron en la caracterización de la señal WiFi sobre campos agrícolas para despliegue de redes de sensores inalámbricos. Realizaron análisis de correlación estadística para diseñar un modelo de pérdida con respecto a los niveles de señal recibida (RSSI). Estos datos se tomaron sobre campos vacíos, campos de algodón y de arroz de agua estancada. [15]

En otro estudio realizado en conjunto por profesionales de España, México y Marruecos, efectuaron la caracterización de un canal de radio para la optimización del despliegue de una red de sensores inalámbricos. Analizaron la influencia de cultivos de maíz y papa sobre la propagación mediante un algoritmo determinístico de lanzamiento de rayos 3D. Las simulaciones se ejecutaron usando antenas direccionales (868 MHz y 2.4GHz) colocadas cerca del suelo y a diferentes alturas. [16]

En la Universidad de las Indias Occidentales (UWI), ubicada en Jamaica, se desarrolló un proyecto enfocado a la caracterización de canales orgánicos de comunicación para aplicaciones de internet en la agricultura. Consideraron al suelo como canal inalámbrico haciendo uso de transceptores en los tallos de árboles de papaya y coco. Finalmente, determinaron un modelo de pérdida por trayectoria procesando y analizando el parámetro S21. [17]

La necesidad de optimización de procesos de gestión y climatización de cultivos motivó a las empresas Champiñones Varablanca S.A. y CRCibernetica.com a desarrollar un proyecto (Open Champi) enfocado a la automatización del proceso productivo de los champiñones de manera controlada [18]. Consistió en la medición de parámetros del cultivo para el control automático de calderas de vapor, enfriadores y equipos de ventilación.

La Agricultura de Precisión (AP) se considera un importante avance en el mercado agrícola por lo que en un artículo de la Revista Científica Ecuatoriana [19] se especifica que la relevancia de la investigación multidisciplinaria en nuestras plantaciones radica en las diferencias climáticas del territorio ecuatoriano con Europa o Norteamérica, lo que impide aplicar paquetes tecnológicos usados en dichas naciones ya que resultan intransferibles.

En la provincia de Azuay, también se han planteado proyectos de modelamiento para monitoreo de plantaciones como cacao, café, papa y maíz; usando soluciones tecnológicas de código abierto en la producción agrícola para beneficiar a pequeños y medianos productores. [20]

En el año 2016, se lanzó el Proyecto de Irrigación Tecnificada para Pequeños y Medianos productores (PIT) a cargo del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) que buscaba mejorar los ingresos de productores a través de la implementación de sistemas de uso y manejo climático inteligente para suelos y aguas. [21]

En la documentación se menciona que uno de los objetivos principales es “...Incrementar y diversificar la producción de la pequeña y media agricultura con irrigación tecnificada a nivel de parcela, desarrollando tecnologías que optimicen el uso y aprovechamiento del agua, como el riego por aspersión o goteo, y sistemas de cosecha y almacenamiento de agua.” [22]

En el cantón Arenillas, Ecuador, también se propuso el diseño e implementación de WSN para aplicaciones en agricultura convencional que permite el monitoreo, control y transmisión de parámetros de cultivo además de contar con un sistema de riego por aspersor.

Este proyecto centró su atención en la topología y arquitectura de comunicación entre dispositivos usando la tecnología ZigBee como estándar para el uso eficiente de recursos naturales, mejora de la sostenibilidad y fiabilidad de la producción agrícola [23].

La implementación se realizó en base a una topología de árbol con un Gateway y nodos de recolección y comunicación [24]. Usaron también herramientas teóricas como zonas de Fresnel y modelo de pérdidas por trayectoria para minimizar pérdida de datos.

Una propuesta similar fue desarrollada en GEA-ESPOL y consistió en el despliegue de una red de sensores inalámbricos sobre parcelas de maíz y cacao para el diseño de un modelo de propagación (gradiente distancia-potencia) y su aplicación en la implementación de un sistema de riego inteligente basado en LoRa [25].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En base al estado del arte planteado en la sección anterior, se conciliaron dos alternativas que pueden dar solución a la problemática expuesta, las mismas que conforman tanto implementación física y análisis de datos sobre el comportamiento de la señal inalámbrica en parcelas de maíz de la Granja Experimental Agrícola de ESPOL.

Ambas alternativas están orientadas al despliegue de una WSN para la recolección de datos RSSI, diferenciándose en que la primera solución propone el uso de la técnica de modelamiento gradiente distancia-potencia que permite definir expresiones matemáticas para la pérdida de propagación y potencia recibida en entornos específicos.

La segunda solución tiene un enfoque prioritario en modelos estadísticos de tiempo como lo son las series temporales, lo que permite predecir la tendencia del comportamiento de las señales en el entorno deseado en base a información recolectada en diferentes temporadas del año.

Esta última es rechazada debido a que la complejidad de los conocimientos requeridos para la selección de datos y análisis estadístico y por los tiempos, más demorados, para obtención de resultados. Además, el enfoque del proyecto se desviaría del área de las telecomunicaciones hacia una índole estadística.

Durante el capítulo anterior se exploraron proyectos anteriores, nacionales e internacionales, con similitudes en la metodología y enfoque. Cabe recalcar que una propuesta fue desarrollada dentro de GEA en la ESPOL haciendo uso de la infraestructura física y lógica del sistema de comunicación que hay en este recinto, pero con diferencias en componentes y planificación.

Es por esto que se decidió escoger la primera solución, diferenciándose en su base al incluir la consideración de parámetros ambientales y de cultivo para determinación de la influencia (si la hubiese) sobre la señal, además de las obstrucciones propias del entorno y la zona. Por último, los modelos de múltiples gradientes ayudarían a la comprensión del comportamiento y cobertura de la señal en todo el sector de estudio.

Los proyectos mencionados anteriormente basaron su uso en tecnologías inalámbricas como WiFi o Zigbee para la comunicación, monitoreo o recolección de datos concerniente a los cultivos. Sólo unas pocas propuestas hicieron uso de una red LoRaWAN.

2.1 Planteamiento de la solución

Para comprender la metodología implementada en el desarrollo de la solución se presenta el diagrama de bloques en la Figura 2.1, que consta de tres etapas: Transmisión y recolección, recepción y almacenamiento de datos y la tercera, procesamiento y análisis de datos.

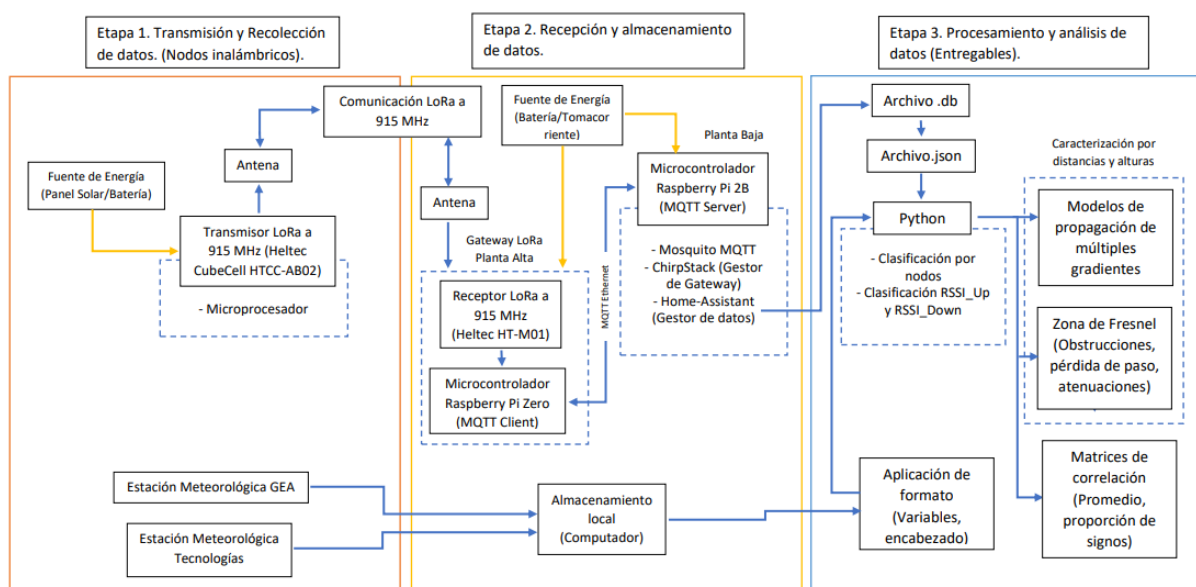


Figura 2.1 Diagrama de bloques de la solución propuesta

Para la etapa de transmisión y recolección de datos se realizó el despliegue de nodos sensores en todo el sector a caracterizar (área total de aproximadamente 21,322 [m^2]) para la transmisión y recepción de datos RSSI. Aquí también se consideraron las estaciones meteorológicas para las mediciones de parámetros de cultivo y parámetros ambientales.

La etapa de recepción y almacenamiento de datos consistió en la red comprendida por el Gateway, que recibe los datos RSSI mediante comunicación LoRa y permite el almacenamiento gracias a las configuraciones a nivel de software realizado dentro de este sistema Open Source.

La tercera etapa comprende el tratamiento y procesamiento de los datos, es decir, la conversión de la trama, que fue manipulada para su transmisión mediante LoRa, a un formato entendible para los usuarios. Se hizo uso de códigos tanto para la conversión de formato como para el procesamiento necesario para la obtención de resultados.

Cabe aclarar que la arquitectura física del sistema de comunicación de la primera y segunda etapa ya se encontraba implementada previamente en la granja a excepción de los nodos sensores, cuya ubicación se tuvo que modificar de acuerdo a una planificación de toma de datos actualizada.

2.2 Especificaciones del Sistema LoRaWAN

A continuación, se presenta de manera breve las especificaciones de la red LoRa de comunicación inalámbrica implementada en la granja.

Tabla 2.1 Especificaciones del sistema LoRaWAN

TABLA DE ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA LORA	
Banda de operación	US915: 902 – 928 [MHz]
Clase	A
Ancho de banda por canal	Subida: 125 [KHz] Bajada: 500 [KHz]
Factor de esparcimiento	SF10
Ganancia de antena Gateway	8 [dBi]
Ganancia de antena nodo	3 [dBi]
Potencia transmisión Gateway	20 [dBm]
Potencia transmisión nodo	20 [dBm]
Altura de antena Gateway	8 [m]
Altura de antena nodo	0.5 [m], 1 [m], 2 [m]

En la Tabla 2.1 se especifica el rango de frecuencias de operación a la que trabajaron los dispositivos electrónicos, el ancho de banda de canal de subida (enlace donde los nodos actúan de transmisor y el Gateway de receptor) y canal de bajada (enlace donde los nodos actúan de receptor y el Gateway de transmisor), la asimetría en ganancias de las antenas a pesar de la misma potencia de transmisión y las alturas correspondientes para Gateway y nodos.

2.3 Descripción técnica de equipos y componentes

GATEWAY HELTEC HT-M01



Figura 2.2 Gateway LoRa Heltec módulo HT-M01 [26]

El dispositivo Heltec módulo HT-M01, modelo mostrado en la Figura 2.2, se usó para la comunicación LoRa por parte del Gateway con los nodos sensores y para

gestión y envío de la información a un servidor local de la red. En la Tabla 2.2 se encontrarán las especificaciones más importantes acerca del dispositivo.

Tabla 2.2 Especificaciones de Heltec HT-M01 [26]

TABLA DE ESPECIFICACIONES HELTEC HT-M01	
Frecuencia de operación	433 MHz, 470 ~ 510 MHz, 868 MHz, 915 MHz
Máxima potencia de salida	20 dB ± 1 dB
Sensitividad del receptor	-142.5 dBm @ 300 bps
Interfaces de comunicación	SPI, USB
Fuente de alimentación	5 V
Protocolos	LoRaWAN Clase A, Clase B, Clase C

CUBE CELL HELTEC HTCC-AB02

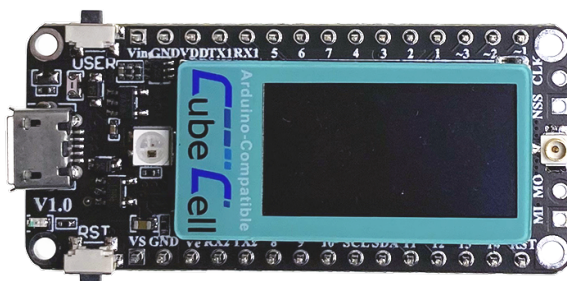


Figura 2.3 Placa de desarrollo Heltec HTCC-AB02 [27]

En la Figura 2.3 se muestra el módulo HTCC-AB02, usado como parte fundamental de los nodos sensores para el registro de datos RSSI y posterior transmisión al Gateway. La Tabla 2.3 señala las especificaciones técnicas de este módulo.

Tabla 2.3 Especificaciones del Heltec HTCC-AB02 [27]

TABLA DE ESPECIFICACIONES HELTEC HT-M01	
Frecuencia de operación	433 MHz, 470 ~ 510 MHz, 865 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 920 MHz, 923 MHz
Maximum output power	20 dB ± 1 dB
Interfaces de comunicación	IPEX, MicroUSB
Fuente de alimentación	5 V
Protocolos	LoRaWAN Class A, Class B, Class C

MÓDULO RELOJ DS1307



Figura 2.4 Circuito de reloj modelo DS1307 [28]

El circuito de reloj mostrado en la Figura 2.4 se empleó para el registro temporal de los datos almacenados, lo cual se realizó por medio de la sincronización del servidor. La Tabla 2.4 muestra las especificaciones eléctricas del circuito.

Tabla 2.4 Especificaciones del módulo DS1307 [28]

TABLA DE ESPECIFICACIONES DC MÓDULO DS1307	
Voltaje	4.5 V to 5.5 V
Temperatura	0°C to 70°C -40°C to +85°C
Voltaje de la batería	2.0 V to 3.5 V
Corriente de alimentación	1.5 mA

RASPBERRY PI ZERO



Figura 2.5 Raspberry Pi Zero [29]

Este dispositivo, presente en la Figura 2.5, complementó el Gateway HT-M01 para el funcionamiento en modo cliente en la comunicación MQTT que se realiza con el servidor. La Tabla 2.5 muestra sus especificaciones técnicas.

Tabla 2.5 Especificaciones del Raspberry Pi Zero [29]

TABLA DE ESPECIFICACIONES RASPBERRY PI ZERO	
Procesador	1 GHz single-core ARM 11 CPU
RAM	512 Mb
GPIO	40 pins
Puertos	Mini HDMI port, Micro USB OTG port, Micro USB power

RASPBERRY PI 2 B



Figura 2.6 Raspberry Pi [30]

En la Figura 2.6 se muestra el Raspberry Pi 2B que se utilizó como Servidor en la comunicación MQTT con el Gateway. Sobre este dispositivo se instaló ChirpStack y Home-Assistant, aplicaciones necesarias para la gestión de gateways y bases de datos respectivamente. Las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Especificaciones de Raspberry Pi [30]

TABLA DE ESPECIFICACIONES RASPBERRY PI 2 MODEL B	
Procesador	900 MHz quad-core ARM Cortex-A7 CPU
RAM	1 Gb
GPIO	40 pines
Puertos	4 USB ports, Full HDMI port

ROUTER NEBULA 1200-AC



Figura 2.7 Router Nebula 1200-AC [31]

El router Nebula de la Figura 2.7 se empleó en la red LAN para la comunicación entre el cliente (dispositivo del usuario) y el servidor. Además, facilitó la descarga de la base de datos almacenada en el servidor. Sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Especificaciones de Router Nebula 1200-AC [31]

TABLA DE ESPECIFICACIONES ROUTER NEBULA 1200-AC	
Bandas de frecuencia	IEEE 802.11 ac/a/n 5 GHz IEEE 802.11 b/g/n 2,4 GHz
Transmisión/Recepción	3 LAN ports 10/100 Mbps 1 WAN port 10/100 Mbps
Antena	4 Omni Antena 5dBi

2.4 Fases del desarrollo de la solución

Para facilitar el desarrollo del proyecto se decidió dividir en 5 fases específicas que permitieron lograr objetivos parciales.

2.4.1 Plan de distribución de sensores

La primera fase del proyecto consistió en la definición del plan de distribución de nodos sensores para la captura de datos RSSI, el cual se diseñó tomando en cuenta la cantidad de nodos sensores disponibles, disposición del terreno, número de radiales, distancia de separación entre nodos, el tiempo para cada nodo en una misma ubicación, tipo de cultivo y área del cultivo a cubrir.

El plan consistió en 4 trayectorias como se observa en la Figura 2.8 para cubrir la zona de interés. En total se contó con 8 dispositivos que sirvieron de nodos por lo que, debido a esta limitación, se definió un tiempo de toma de datos por trayectoria con una duración de 2 días para cada una.

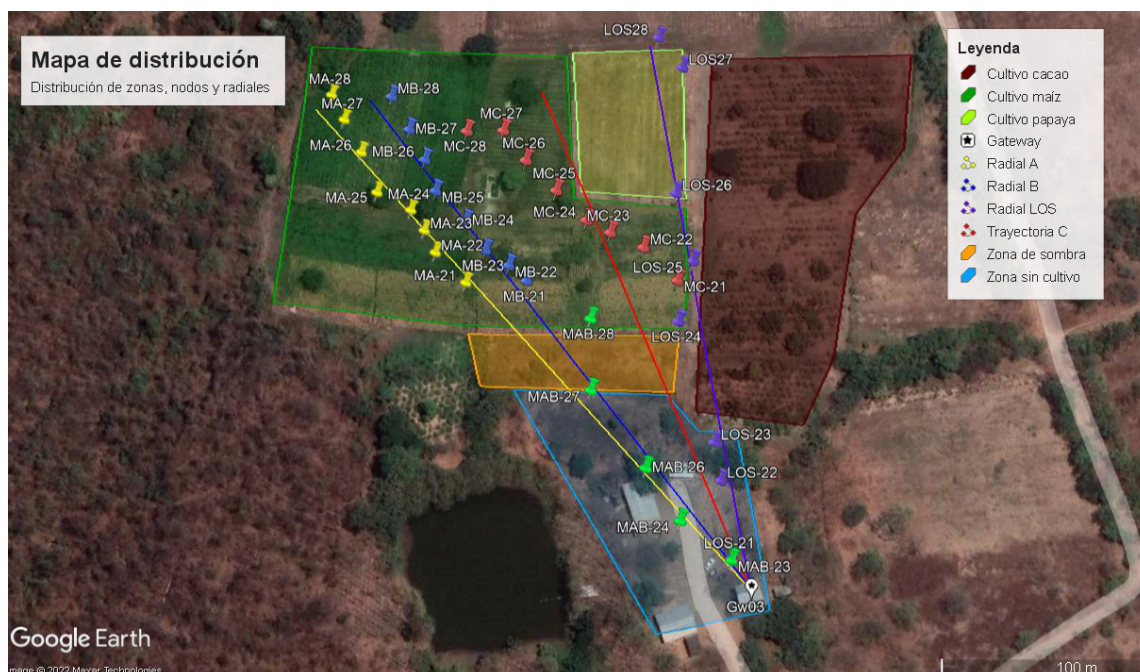


Figura 2.8 Despliegue de nodos sensores y Gateway (Datos RSSI) - vista superior

Es así como, en total, las hileras A y B se conformaron de 13 nodos, la trayectoria C de 12 y el radial LOS de 8 nodos. La nomenclatura usada para los nodos en el mapa y en el posterior análisis hace referencia al cultivo de maíz (M) y la hilera donde se encuentra. Se configuró que cada nodo enviara tramas cada 5 minutos y para cada una de estas trayectorias se tomaron datos a diferentes alturas las cuales fueron: 0.5, 1 y 2 [m] desde el nivel del suelo.

El sector de estudio (visto en Figura 2.8) se dividió de la siguiente manera, considerando al Gateway como punto de referencia: una zona sin cultivo (recuadro celeste) desde el Gateway hasta los 93 [m], la zona de depresión del terreno (denominada “zona de sombra”, recuadro naranja) de 25 [m] de extensión y la zona de cultivo (recuadro verde) que comprende las parcelas de maíz estudiadas desde los 125 [m] hasta los 240 [m].

Estos valores de distancia de separación son aproximados ya que se debe tener en cuenta que para cada trayectoria el perfil del terreno varía por lo que no todas las zonas comenzarán a la misma distancia para cada hilera. Los perfiles de elevación para las hileras A, B, C y LOS pueden consultarse desde la Figura 2.14 hasta Figura 2.17 en Apéndices.

Con respecto a la zona sin cultivo se observa una trayectoria AB, la misma que fue agregada para completar las hileras de A y B en esta zona. La trayectoria LOS, en cambio, marca un recorrido fuera de los cultivos (recuadro amarillo en Figura 2.8), y sus primeros 4 nodos se usaron para completar la trayectoria de C. La trayectoria LOS se definió de tal forma que en cada ubicación del nodo se pudiera visualizar la caseta del Gateway para lograr un efecto de línea de vista.

La variación en las alturas se realizó para estudiar la afectación de las obstrucciones del entorno en los niveles de potencia, estos obstáculos correspondieron a árboles, casetas y cultivo, además de una depresión en el terreno

de casi 4 [m] de diferencia de altura que puede consultarse en los perfiles de elevación en Apéndices.

Por último, al momento de la toma de datos los cultivos de maíz se encontraban en el Estadio R6, conocido como “Madurez Fisiológica” en el desarrollo reproductivo del grano. Esto significa que el producto se encuentra en su etapa final de crecimiento al haber alzado su máxima acumulación de materia seca y presentar una coloración amarilla en la mayoría de sus hojas [32], así como se aprecia en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Estado del cultivo durante la toma de datos RSSI

2.4.2 Toma de datos RSSI

Lo detallado en la planificación se llevó a cabo desde el martes 31 de mayo hasta el sábado 25 de junio del 2022 durante la estación climática seca (verano) de la región costa dentro del territorio ecuatoriano. En este periodo se completaron las trayectorias A, B, C y LOS.

En la Tabla 2. 8 (véase en Apéndices) se especifican las coordenadas para cada nodo dentro de cada radial y en la Tabla 2.9 (Véase en Apéndices) se puede consultar el cronograma de toma de datos RSSI.

Durante esta fase hubo inconvenientes con las mediciones debido a cortes eléctricos, fallos en la conexión de los nodos o daños en la electrónica de estos. Por lo mencionado, se realizaron lecturas de ajuste en fechas posteriores para que no afectasen la continuidad como se indica en la Tabla 2.9.

2.4.3 Toma de datos de parámetros ambientales y de cultivo

Los datos concernientes a los parámetros ambientales y de cultivo fueron recolectados durante el mismo periodo de toma de datos RSSI mediante las estaciones meteorológicas: Estación Meteorológica ubicada dentro de GEA-ESPOL para parámetros de cultivo y la Estación Meteorológica ubicada en Tecnologías-ESPOL para los ambientales, así como se observa en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Ubicación de las Estaciones Meteorológicas dentro del Campus Gustavo Galindo de la ESPOL

2.4.4 Filtrado y procesamiento de datos

Se hizo uso de diferentes códigos para la extracción y tratamiento de los datos de RSSI y parámetros obtenidos en la segunda y tercera fase respectivamente.

Para los datos RSSI el procedimiento consistió en convertir la base de datos obtenida en .dB a un formato .json por medio de DBbrowser, la cual posteriormente se filtró en Python para obtener archivos .csv en las diferentes ubicaciones. En total se crearon archivos para cada nodo en las 4 trayectorias y a las 3 diferentes alturas, los mismos que contenían la información mostrada en la Figura 2.11.

Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9	Column10	Column11	Column12	Column13
publishedAt	ubicado	modulo_disp	dispositivo	fCnt	rss_i_up	snr_up	channel_up	rfChain_up	gtw_rx	dr_down	rss_i_down
2022-05-31 12:05:01.712976	MA21	modulo	cc21	295	-78	6.5	4	1	Gw03	10	-67
2022-05-31 12:10:02.896325	MA21	modulo	cc21	296	-83	7.8	7	1	Gw03	10	-68
2022-05-31 12:15:04.484612	MA21	modulo	cc21	297	-79	6.8	5	1	Gw03	10	-71
2022-05-31 12:20:06.287562	MA21	modulo	cc21	298	-85	7.2	1	0	Gw03	10	-68
2022-05-31 12:25:07.454133	MA21	modulo	cc21	299	-73	6.2	2	0	Gw03	10	-69
2022-05-31 12:30:09.044904	MA21	modulo	cc21	300	-87	6.8	7	1	Gw03	10	-68
2022-05-31 12:35:10.376127	MA21	modulo	cc21	301	-80	7.2	0	0	Gw03	10	-71
2022-05-31 12:40:12.206692	MA21	modulo	cc21	302	-85	7	4	1	Gw03	10	-68

Figura 2.11 Datos RSSI del nodo MA-21 a 1 metros de altura

Por otra parte, los parámetros ambientales y de cultivo se recibieron directamente en una base de datos en formato .csv, por lo que únicamente se realizó un filtrado para el periodo requerido, tal y como se muestran en las Figura 2.12 y Figura 2.13.

Column	Time	Barómetro - mm Hg	Temp - °C	Temp,Alta - °C	Temp Baja - °C	Hum - %	Punto de rocío - °C	Bulbo Húmedo - °C	Velocidad del viento - km/h
31/5/2022	0:00:00	764,3	21	21	21	91	20	20	5
31/5/2022	0:15:00	764,2	21	21	21	91	20	20	3
31/5/2022	0:30:00	764,1	21	21	21	91	19	20	3
31/5/2022	0:45:00	764	21	21	21	91	19	20	3
31/5/2022	1:00:00	764	21	21	21	91	19	20	5
31/5/2022	1:15:00	763,9	21	21	21	91	19	20	5
31/5/2022	1:30:00	763,7	21	21	21	90	19	19	5
31/5/2022	1:45:00	763,7	20	21	20	90	19	19	5
31/5/2022	2:00:00	763,5	20	20	20	90	19	19	5
31/5/2022	2:15:00	763,5	20	20	20	91	19	19	3
31/5/2022	2:30:00	763,4	20	20	20	91	19	19	3
31/5/2022	2:45:00	763,2	20	20	20	91	19	19	5
31/5/2022	3:00:00	763,2	20	20	20	91	19	19	5

Figura 2.12 Parámetros de cultivo de la Estación meteorológica en GEA

Column2	Column3	Unit.0	Column5	Column6	CH:001	CH:002	CH:003	CH:004	CH:005	CH:006	CH:007	CH:008	CH:009	CH:010
Date	Time	ColdJunc0	PowerVolt	PowerKind	WS(ave)	WD(ave)	WS(max)	WD(most)	WS(inst_m)	WD(inst_m)	Max_time	Solar_rad	TEMP	Humidity
yyyy/mm/dd	hh:mm:ss	°C	V		m/s	°	m/s		m/s	°		kW	°C	%
44713		0	20,6	13	2	0	303	0 W	1,3	345	0,998842593	0	20,8	97,71
44713	0,006944444		20,6	13	2	0,2	343	0,2 NNW	1,3	317	0,001574074	0	21	96,51
44713	0,013888889		20,7	13	2	0,2	0	0,3 N	1,3	347	0,008553241	0	21,4	93,71
44713	0,020833333		20,8	13	2	0,1	356	0,3 NNW	1,3	347	0,015416667	0	21,6	90,5
44713	0,027777778		20,9	13	2	0,1	349	0,1 N	1,3	20	0,025451389	0	21,9	88,5
44713	0,034722222		21	13	2	0	70	0,1 NE	0,7	39	0,027881944	0	21,8	90,81
44713	0,041666667		21,1	13	2	0	150	0 SSE	0	150	0,034733796	0	21,7	93,31
44713	0,048611111		21,2	13	2	0	50	0 NE	0	145	0,041678241	0	21,5	92,61
44713	0,055555556		21,2	13	2	0	49	0 E	1,3	281	0,054386574	0	21,9	86,6
44713	0,0625		21,3	13	2	0,3	290	0,3 NW	1,9	276	0,059884259	0	22	83,7
44713	0,069444444		21,3	13	2	0,6	314	0,6 NNW	2,5	338	0,064988426	0	22,1	82,6
44713	0,076388889		21,4	13	2	1,3	352	1,3 N	3,1	354	0,070798611	0	21,9	83,19

Figura 2.13 Parámetros de cultivo de la Estación meteorológica en bloque de Tecnologías

2.4.5 Entregables

En esta etapa se tomaron los datos obtenidos para el diseño de los entregables propuestos en la solución, estos son:

- Análisis de la **primera zona de Fresnel** para cada nodo, considerando las obstrucciones presentes en la trayectoria del enlace y su relación con la pérdida de paso y atenuación.
- Los **modelos de propagación en base a múltiples gradientes** para diferentes alturas de los nodos y considerando la zona sin y con cultivo y todas las trayectorias del sector, además de la comparación de estos en dos periodos diferentes. Estos resultados son obtenidos directamente mediante el empleo de códigos de Python.
- Análisis de las **matrices de correlación entre valores RSSI de la señal recibida y los parámetros ambientales y de cultivo** que permita identificar la influencia del entorno sobre los enlaces inalámbricos. Estas matrices son obtenidas mediante códigos de Python

2.5 Descripción de cálculos adicionales

2.5.1 Cálculo de porcentaje de obstrucción en Zona de Fresnel y atenuaciones/pérdida de paso

Para este cálculo de estos valores se midieron las dimensiones de las obstrucciones identificadas en cada trayectoria y luego, mediante Google Earth, se obtuvieron las distancias de separación entre el Gateway y cada nodo analizado presentes en el mapa de la Figura 2.9. El cálculo de estos valores se realizó de forma manual por medio de ecuaciones de Excel.

Con los gráficos de la primera zona de Fresnel se midió la porción del lóbulo que se ve atravesado por la obstrucción, lo cual se aprecia en la ecuación 2.1. En caso de existir más de un punto que atravesase la zona de Fresnel se tomó la máxima porción atravesaba (tal es el caso del suelo y cultivo).

$$\%obs = \frac{\text{porción de obstrucción [m]}}{\text{ancho de zona de Fresnel [m]}} \times 100 \quad (2.1)$$

Por otra parte, la pérdida de paso L_p depende de la potencia transmitida por el nodo o Gateway P_{Tx} , el valor RSSI promedio y la ganancia del receptor G_R , siendo que este último parámetro variará según se trate del canal de subida o bajada (downlink: 3 dBi, uplink: 8 dBi). Esta expresión se describe en la ecuación 2.2.

$$L_p[dB] = P_T + |RSSI| + G_R \quad (2.1)$$

Finalmente, la atenuación se calculó como la relación entre la pérdida de paso L_p con la distancia d entre el Gateway y nodo de interés, como indica la ecuación 2.3.

$$\text{atenuación}[dB/m] = \frac{L_p [dB]}{d [m]} \quad (2.3)$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología anteriormente planteada, la misma que consiste en el análisis y relación entre la información brindada por los perfiles del terreno y primera zona de Fresnel con, la correlación entre niveles RSSI, parámetros de cultivo y ambientales y modelos propagación de múltiples gradientes con el fin de describir y conocer el comportamiento de la señal inalámbrica sobre el entorno de interés.

3.1 Zonas de Fresnel y correlación

Mediante el estudio de la primera zona de Fresnel se logró identificar la influencia de obstáculos sobre los valores RSSI medidos en cada nodo desde el Gateway y viceversa, teniendo en cuenta el tipo y porcentaje de obstrucción. En paralelo se analizaron los coeficientes de correlación considerando las características de las trayectorias.

3.1.1 Altura del nodo: 0.5 [m]

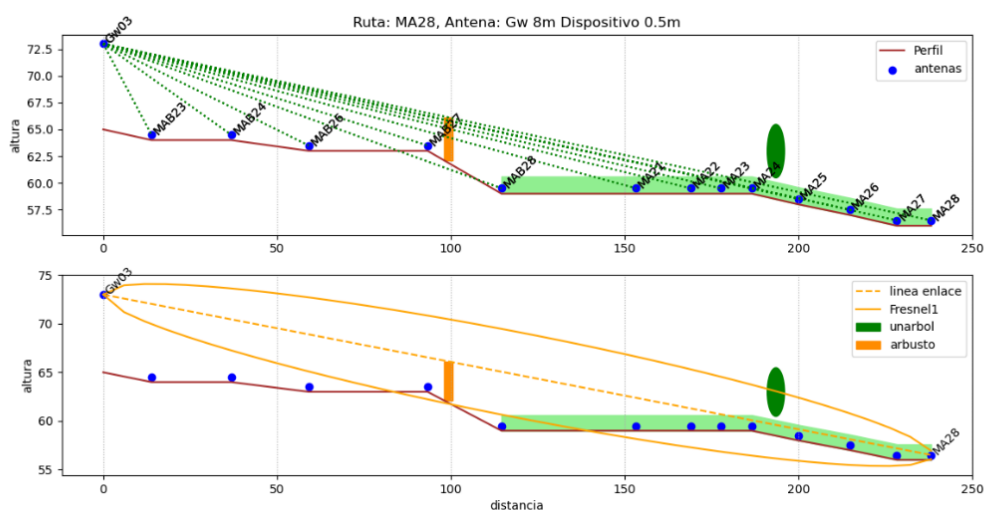


Figura 3.1 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MA-28, altura de 0.5 [m]

En la trayectoria A, presentada en Figura 3.1, las obstrucciones que afectan la primera zona de Fresnel corresponden a: suelo, cultivo, arbusto a 98 [m] y árbol 3 ubicado a 193.50 [m] medidos desde el Gateway y dependiendo de cuál dispositivo se analice.

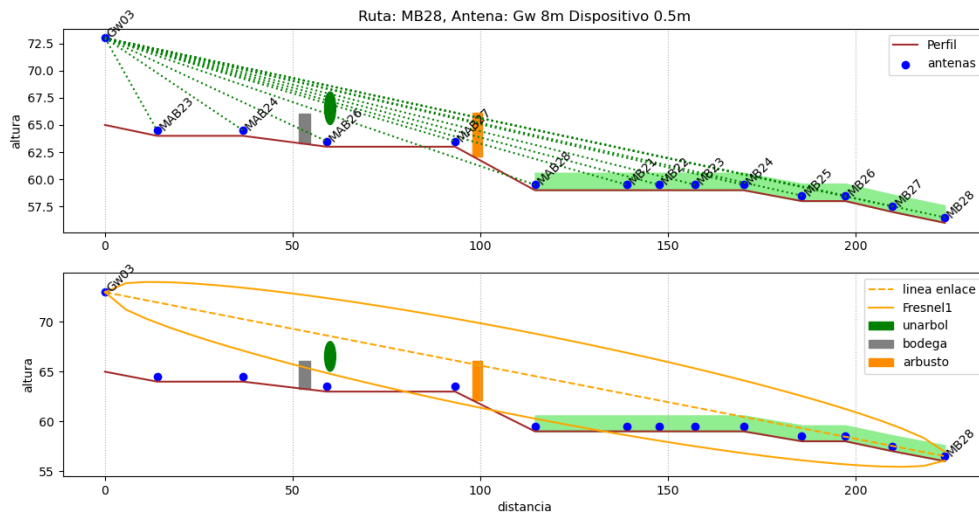


Figura 3.2 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MB-28, altura de 0.5 [m]

En trayectoria B, presentada en la Figura 3.2, las obstrucciones que se encuentran a lo largo del despliegue de nodos son: bodega a 51.6 [m], árbol 2 a 60 [m], arbusto a 98 [m], por suelo y cultivo. Todas las distancias están medidas desde el Gateway hacia el nodo analizado.

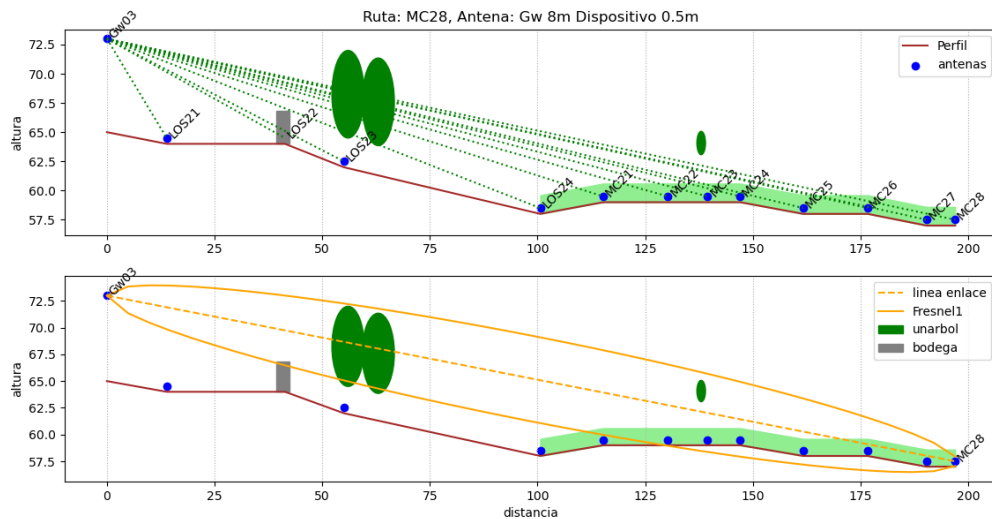


Figura 3.3 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MC-28, altura de 0.5 [m]

En trayectoria C, presentada en Figura 3.3, las obstrucciones que se encuentran a lo largo de la hilera son: bodega a 39.40 [m], árbol 4 a 56 [m], árbol 5 a 63 [m], árbol 6 a 138 [m], por suelo y cultivo.

Comparando esta información con los valores de correlación calculados entre RSSI vs parámetros ambientales (ver Apéndices: Tabla 3.9, Tabla 3.10 y Tabla 3.11), los coeficientes de correlación del ambiente resultaron nulos, en su mayoría, a diferencia de los obtenidos con parámetros de cultivo. Por lo mismo, se centrará el análisis de los resultados en las matrices de correlación de RSSI vs parámetros de cultivo.

Se observó de manera recurrente el patrón de signos en Tabla 3.6 (Véase en Apéndices), donde las correlaciones resultaron negativas para la Temperatura y Radiación Solar (en su mayoría) mientras que las positivas aparecieron más en porcentaje de humedad del ambiente y presión atmosférica (Barómetro).

En canal de subida (de nodos a Gateway) las correlaciones, en general, fueron menores que las del canal de bajada. Esta aleatoriedad puede explicarse mediante la asimetría en ganancias de las antenas ya que los nodos operaron como transmisor y

se ubicaron en medio del maíz (obstrucciones más cercanas) y al inyectar una menor ganancia (3 dBi), se perdió mayor señal.

En canal de bajada (de Gateway hacia nodos), las primeras obstrucciones se encontraron más alejadas y considerando la ganancia de la antena del Gateway (8 dBi), se receptaron mejores niveles de RSSI a pesar de la menor sensibilidad en la antena de los nodos.

Estos comportamientos se complementan con el ancho de banda de cada canal, lo cual facilita una mayor variabilidad en el enlace uplink al disponer de menor espectro de transmisión que el downlink (downlink: 500 [KHz], uplink: 125 [KHz]).

Se notaron casos donde se invirtió el patrón de signos en el enlace downlink como por ejemplo en: MA-25, MB-26, MB-27, MB-28 y MC-24 y MC-25. Un aspecto en común para estos nodos fue la ubicación cercana a obstrucciones debido a suelo, exceptuando MC-24, ya que este nodo junto con MC-25 mostraron mayor dispersión en las lecturas medidas para el canal de bajada como se puede consultar en la primera columna de cada enlace en la Tabla 3.6 (consultar en Apéndices).

Las correlaciones presentaron una relación “débil” y en pocos casos, “moderada”. Se notó que en estos últimos casos (por nombrar algunos: MA-23, MA-26, MA-27), los nodos estaban afectados fuertemente por obstrucciones como suelo y árboles, entre otros (consultar Tabla 3.14, Tabla 3.17 y Tabla 3.20). Adicionalmente, la presencia del personal de la granja representa un factor aleatorio y no medible que pudo afectar también en las lecturas.

En la Tabla 3.1 se hace nota que, independientemente de la variabilidad presente, existió un mayor porcentaje de nodos con relación inversa entre el RSSI medido vs la temperatura o radiación solar. Lo contrario ocurrió para los parámetros de humedad y presión atmosférica, siendo que únicamente se reduce el nivel de correlación puesto que existen una mayor proporción de nodos con altas desviaciones.

Tabla 3.1 Correlaciones promedio y porcentajes de nodos por tipo de relación para parámetros de cultivo en enlace de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA a 0.5 [m]

50cm	RSSI_UP vs				RSSI_DOWN vs			
	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
Promedio	-0,095	0,085	-0,082	0,030	-0,141	0,136	-0,122	0,055
% Positivo	29,17	58,33	37,5	54,17	25	70,83	12,5	58,33
% Negativo	70,83	41,67	62,5	45,83	75	29,17	87,5	41,67

3.1.2 Altura del nodo: 1 [m]

La primera zona de Fresnel para nodos a 1 [m] pueden ser consultados en el Apéndices: Figura 3.13, Figura 3.14 y Figura 3.15 para los respectivos radiales A, B y C. En dichas gráficas se toman en cuenta los nodos de los radiales MAB y LOS importantes. Las obstrucciones a esta altura aumentaron debido a los árboles y se redujeron para el resto de los obstáculos.

La mayoría de los porcentajes de obstrucción (ver Apéndices: Tabla 3.15, Tabla 3.18 y Tabla 3.21) se redujeron puesto que la primera zona de Fresnel se alza sobre los obstáculos presentes. Para las obstrucciones por árboles cercanos a los nodos finales, la zona de Fresnel tendió a opacarse debido a hojas y ramas aumentando así los porcentajes calculados, como se observa en MA-25 a causa del árbol 3.

Con el aumento de altura se observó mayor variabilidad en los signos y niveles de fuerza en los coeficientes de correlación de la Tabla 3.7 (véase en Apéndices) en el canal de bajada, debido a que en muchos casos aumentaron o se redujeron los porcentajes de obstrucción.

En la Tabla 3.2 se aprecia que el porcentaje de nodos con mayor relación inversa se dio en los parámetros de temperatura y radiación solar. El porcentaje de casos con mayor relación directa se dieron en los parámetros de humedad y presión atmosférica, aunque en menor proporción y magnitud, dado que se observó mayor variabilidad.

Tabla 3.2 Correlaciones promedio y porcentajes de nodos por tipo de relación para parámetros de cultivo en enlace de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA a 1 [m]

1m	RSSI_UP vs				RSSI_DOWN vs			
	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
Promedio	-0,079	0,065	-0,044	0,060	-0,014	-0,003	-0,023	0,038
% Positivo	37,5	62,5	50	66,67	41,67	58,33	29,17	54,17
% Negativo	62,5	37,5	50	33,33	58,33	41,67	70,83	45,83

3.1.3 Altura del nodo: 2 [m]

A esta altura, las obstrucciones debido al cultivo y suelo se redujeron drásticamente en la mayoría de los nodos (ver Apéndices: Figura 3.16, Figura 3.17 y Figura 3.18). Los porcentajes de obstrucción variaron según la disposición del terreno y el nodo de interés (consultar en Apéndices: Tabla 3.16, Tabla 3.19 y Tabla 3.22), al igual que a 1 [m] de altura. Las atenuaciones resultaron menores conforme aumentó la altura a pesar de que los porcentajes debido a obstrucciones no se redujeron.

De acuerdo con lo observado en la Tabla 3.8 (véase en Apéndices), el aumento de altura denotó, nuevamente, una mayor variabilidad en los niveles de fuerza de la correlación y poca consistencia sobre la secuencia de signos de los coeficientes. Este comportamiento dejaría en evidencia que los nodos a 0.5 [m] presentaron mayor estabilidad en los coeficientes de los parámetros de cultivo.

Tabla 3.3 Correlaciones promedio y porcentajes de nodos por tipo de relación para parámetros de cultivo en enlace de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA a 2 [m]

2m	RSSI_UP vs				RSSI_DOWN vs			
	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
Promedio	-0,025	0,014	-0,015	0,005	-0,092	0,074	-0,077	0,039
% Positivo	43,48	52,17	47,83	56,52	43,48	56,52	34,78	60,87
% Negativo	56,52	47,83	52,17	43,48	56,52	43,48	65,22	39,13

Existen similitudes en el comportamiento de los porcentajes a esta altura con los casos anteriores de 0.5 y 1 [m], en donde, el % de relación inversa y directa presentaron muy poca diferencia puesto que las variaciones entre datos resultaron ser las mayores según lo presentado en la Tabla 3.3. Es así como, esta sucesión de correlaciones presentó los menores niveles de fuerza.

3.2 Modelos de propagación en base a múltiples gradientes para 3 alturas diferentes

A continuación, se introducen los modelos de múltiples gradientes organizados por alturas, de tal forma que se aprecie la incidencia de esta variación sobre el comportamiento de los valores RSSI considerando todas las trayectorias de nodos.

La información de interés corresponde a la obtenida para zona sin cultivo y zona con cultivo representado por el primer y tercer segmento respectivamente, descartando la zona de sombra (segundo segmento) y nodos marcados en rojo, de los cálculos y análisis tanto para los dos enlaces.

El primer segmento denota el comportamiento RSSI en la zona sin cultivo (antes de la depresión del terreno) donde existía aparente línea de vista entre nodos (trayectorias MAB y LOS a 1 [m]) y el Gateway, debido a esto, la información se verá repetida en las gráficas de las tres alturas.

3.2.1 Altura de nodos a 0.5 [m]

Se presenta modelo de propagación en base a gradientes distancia-potencia para toda la zona de estudio considerando altura de nodos sensores de 0.5 [m].

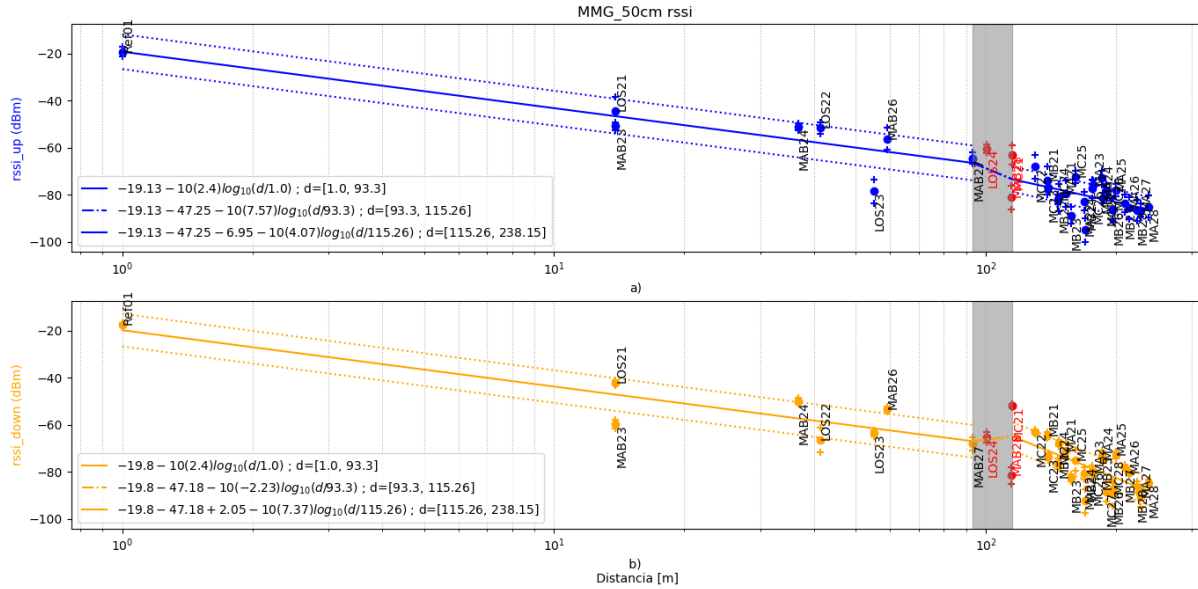


Figura 3.4 Modelo de propagación de múltiples gradientes con altura de nodos de 0.5 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

En la Figura 3.4, considerando las características del entorno para el primer segmento, el gradiente es el mismo para canal de subida y de bajada a pesar de la asimetría de ganancias en antenas y sensibilidad del transmisor y receptor. No obstante, aunque las distancias hacia los obstáculos cercanos son diferentes en cada enlace, esto no parece causar variación en la recepción de la señal.

En el tercer segmento sí se observa variación en los gradientes para los dos enlaces, siendo que en downlink es casi 2 veces mayor que en uplink. Para analizar con más detalle este comportamiento, se realizó un acercamiento en la gráfica para el segmento en zona de cultivo destacando tres cortes para visualizar mejor cómo varía el gradiente.

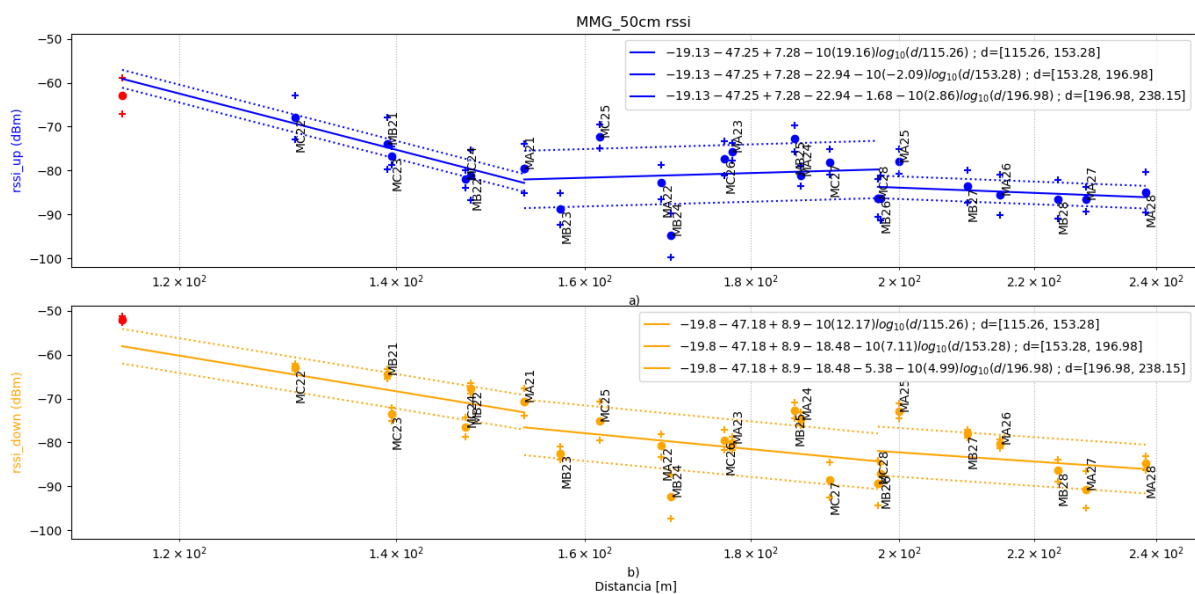


Figura 3.5 Segmento del modelo de propagación en zona de cultivo con altura de nodos de 0.5 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

En la Figura 3.5, para el canal de subida, durante los primeros nodos luego de la zona de sombra, el gradiente es muy bajo indicando una disminución en el RSSI. Durante el segundo corte, el gradiente resultó ligeramente positivo por lo que, en esta zona, los niveles de la señal mejoran ya sea por diferentes mecanismos de propagación u otros factores.

En el tercer corte estaban los nodos más alejados de cada trayectoria y que, además, se ubicaron en pequeñas bajadas del perfil del terreno. Esto puede explicar el comportamiento nuevamente bajo del gradiente, pero suavizado en valor con respecto al primer corte. En enlace downlink, para los tres cortes realizados, los gradientes resultaron bajos, pero, iban mejorando a medida que aumentaba la distancia.

Los símbolos de cruces superior e inferior denotan la dispersión de datos tomados para cada nodo. En enlace uplink, la dispersión resultó mucho mayor, aunque esto parece no afectar realmente al comportamiento del gradiente, sino el RSSI medio.

3.2.2 Altura de nodos a 1 [m]

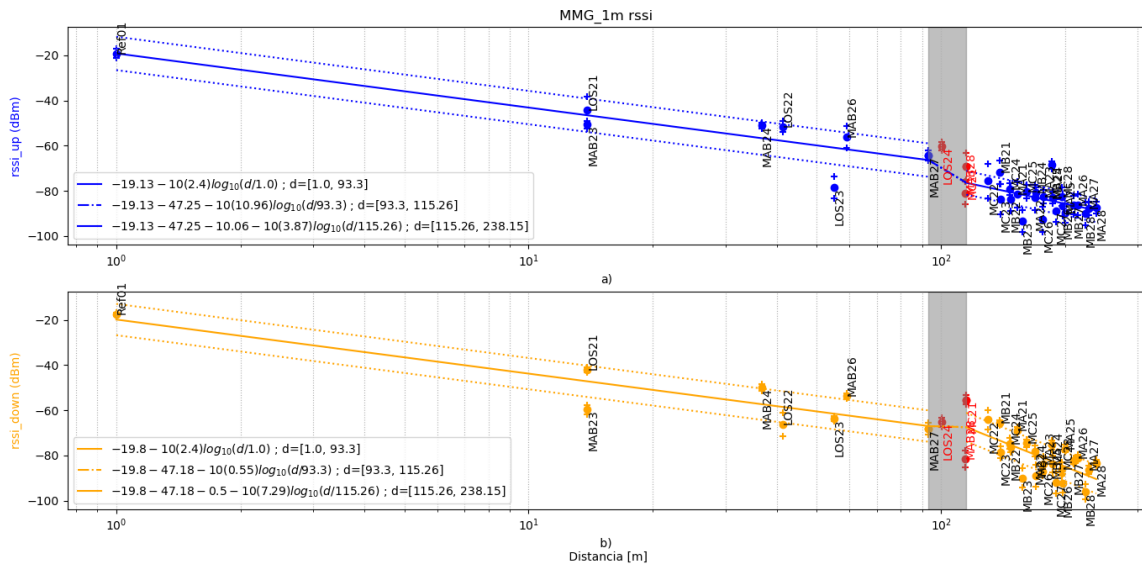


Figura 3.6 Modelo de propagación de múltiples gradientes con altura de nodos de 1 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

Los nodos ubicados a 1 [m] del suelo, mejoró el gradiente en ambos enlaces para la zona sin cultivo bajo el razonamiento que a mayor altura se esperaba menor afectación por obstrucciones, como se observa en la Figura 3.6.

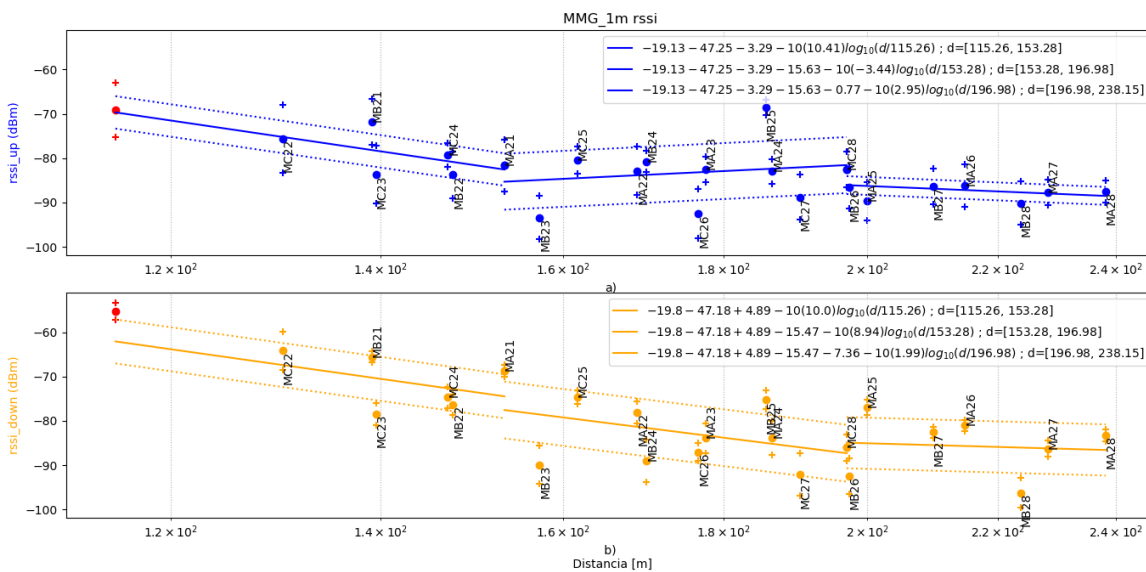


Figura 3.7 Segmento del modelo de propagación en zona de cultivo con altura de nodos de 1 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

En la Figura 3.7 se muestra el tercer segmento con los tres cortes realizados a las mismas distancias que en 0.5 [m]. En uplink, el gradiente del primer corte resultó muy bajo, durante el segundo corte resultó ligeramente positivo y de nuevo un gradiente bajo pero pronunciado en tercer corte. En downlink el gradiente se mantuvo bajo en los tres cortes.

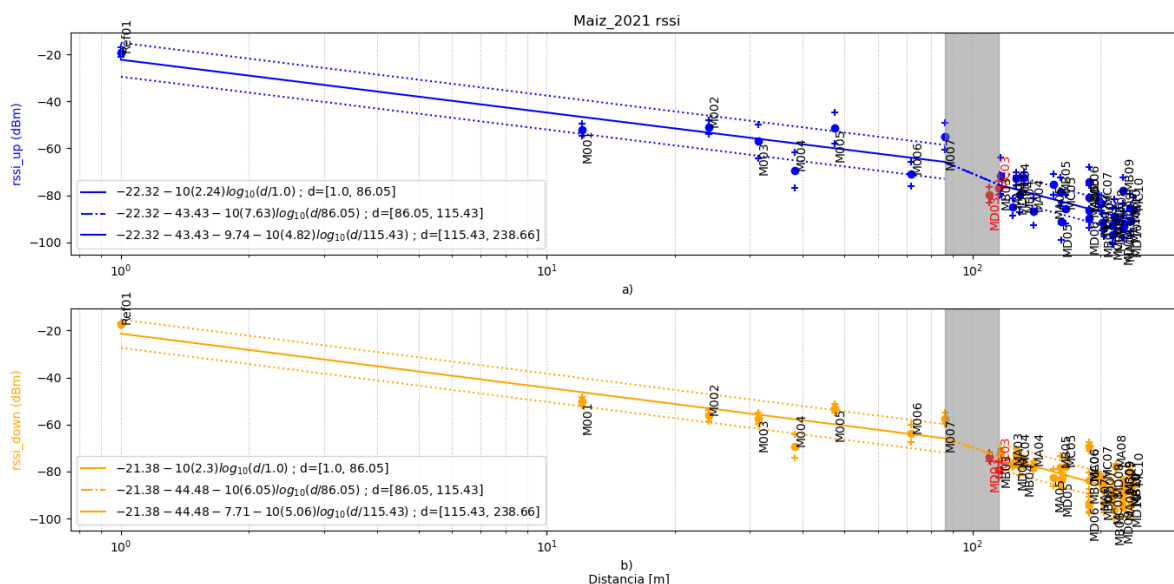


Figura 3.8 Modelo de propagación (2021) de múltiples gradientes con altura de nodos de 1 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

Se realizó una comparación entre el modelo de propagación con nodos a 1 [m] obtenido en el presente proyecto versus el modelo considerando otra planificación llevada a cabo en 2021 por GIRNI mostrado en Figura 3.8. La toma de datos se la realizó entre inicios de noviembre y diciembre y se consideraron cuatro trayectorias. El mapa de planificación puede consultarse en Apéndices, Figura 3.12.

Al considerar una sola trayectoria en zona sin cultivo (M00X) para la zona sin cultivo, el gradiente resultó ligeramente menor al calculado en el presente proyecto. Esto puede ser por el uso de MA y LOS que presentaban diferentes obstrucciones.

En enlace uplink se mantiene el gradiente menor con mayor dispersión en los datos en comparación con enlace downlink. No obstante, en el canal de bajada se obtuvo un gradiente considerablemente menor que en 2022.

3.2.3 Altura de nodos a 2 [m]

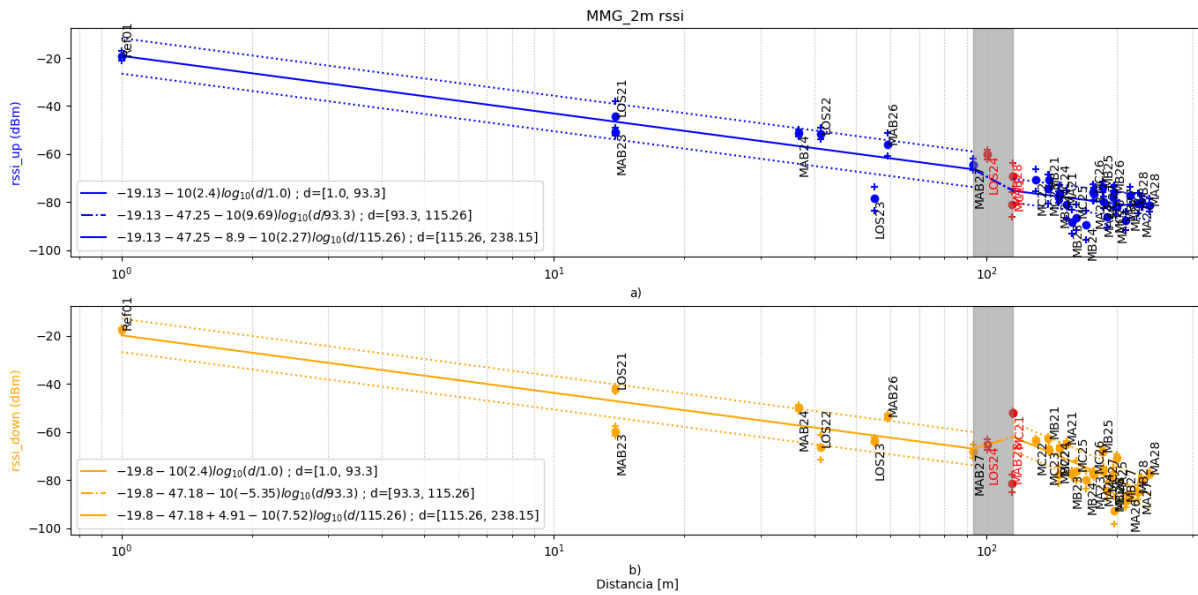


Figura 3.9 Modelo de propagación de múltiples gradientes con altura de nodos de 2 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

En la Figura 3.9, en el canal de subida se observa una mejora del gradiente (tercer segmento) presentando el más alto entre las tres alturas, esto en concordancia con el efecto de Línea de vista que se pretendía obtener a 2 [m]. Sin embargo, en downlink no se obtuvo una mejora.

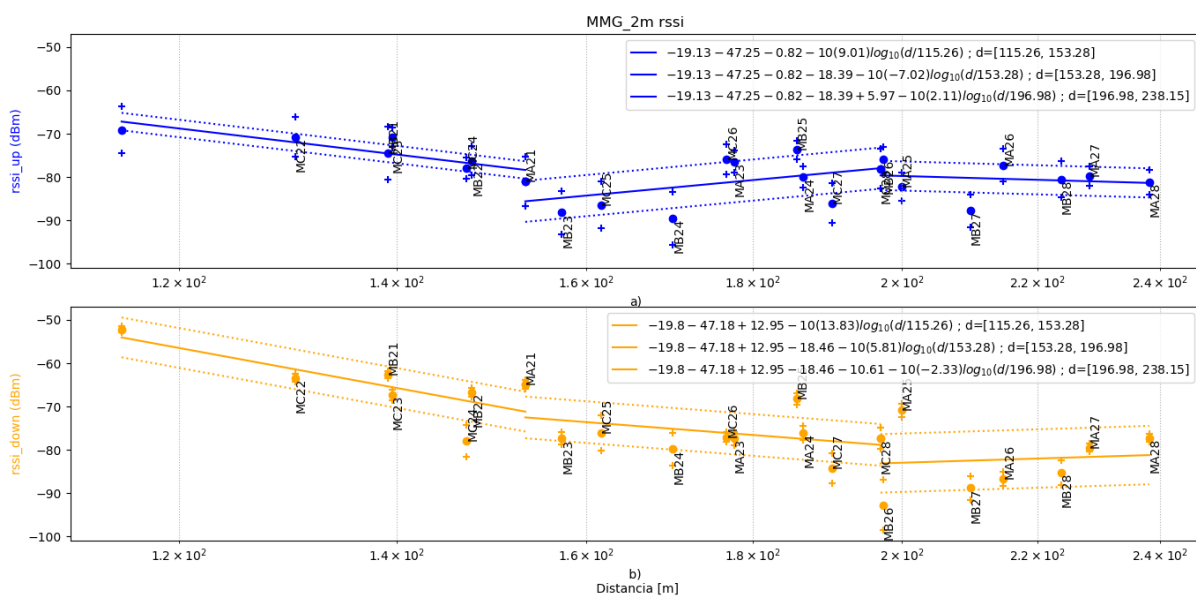


Figura 3.10 Segmento del modelo de propagación en zona de cultivo con altura de nodos de 2 [m]. a) Modelo para enlace uplink (azul). b) Modelo para enlace downlink (naranja).

Para los cortes en el segmento de la zona con maíz, como se aprecia en la Figura 3.10, en enlace uplink se mantiene el comportamiento de gradientes mientras que en el de bajada, los dos primeros cortes presentan gradientes muy bajos y acentuados, mientras que en el último corte mejoran los niveles de RSSI.

En el primer corte intervinieron varios de los primeros nodos de la trayectoria C que, consultando la Tabla 3.22 (véase en Apéndices), presentaron obstrucción del 100% por árbol 4 y 5. Son dichos nodos los que empeoran el gradiente resultando ser el mayor para la zona de cultivo en comparación con los de 0.5 y 1 [m].

Durante el último corte, la mejora del gradiente puede explicarse teniendo en cuenta que, aunque los nodos estén aumentando su distancia de separación y habrá pérdidas debido a esto, ya no se consideran las afectaciones por cultivo y cada vez las obstrucciones por árboles y terreno generarán menos impacto.

Por último, en la Tabla 3.4 se visualiza la comparación entre gradientes confirmando el efecto de mejora en el gradiente para la zona de cultivo a medida que se aumentó altura de los nodos en uplink. No obstante, en downlink se observó mejora en las dos primeras alturas, pero a 2 [m] empeoró.

Tabla 3.4 Tabulación de gradientes por planificación, zonas sin y con cultivo y enlaces

h [m]	Planificación 2021				Planificación 2022			
	Uplink		Downlink		Uplink		Downlink	
	Sin cultivo	Con cultivo	Sin Cultivo	Con cultivo	Sin cultivo	Con cultivo	Sin Cultivo	Con cultivo
0.5	N/A	N/A	N/A	N/A	2.4	4.07	2.4	7.37
1	2.24	4.82	2.30	5.06		3.87		7.29
2	N/A	N/A	N/A	N/A		2.27		7.52

Los valores obtenidos para la presente planificación guardan concordancia con el comportamiento del gradiente a 1 [m] de la planificación del 2021 para la zona con cultivo. Las diferencias entre estos valores en la zona con cultivo de maíz son debido a número de trayectorias, cantidad y coordenadas de ubicación de nodos usados para zona sin y con cultivo, periodo de tomas de datos, plantación de estudio e incluso la presencia de trabajadores, las cuales favorecieron en baja medida a la planificación del 2021.

3.3 Análisis de costos

La red LoRa actualmente implementada en la granja experimental es open source, que significa que trabaja con esquemas abiertos de software y hardware. En cuanto a software no fue necesaria una inversión monetaria ya que se usaron aplicativos, protocolos y gestores gratuitos.

Con respecto al hardware, en la Tabla 3.5 se listan los componentes y elementos más importantes en un nodo individual y se presenta un estimado de la inversión necesaria para el sistema de comunicación LoRa.

Tabla 3.5 Detalle de componentes y precios para el sistema de comunicación LoRaWAN

Sistema de comunicación LoRaWAN			
LoRaWAN Gateway			
Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Subtotal
Heltec HT-M01	\$100.00	1	\$100.00
Antena Fiber Glass 8 dBi 860-930 MHz	\$60.00	1	\$60.00
Raspberry PI 2 B	\$109.00	1	\$109.00
Raspberry PI Zero	\$54.95	1	\$54.95
Módulo Reloj DS1307	\$2.30	1	\$2.30
Router Nebula 1200-AC	\$50.00	1	\$50.00
SUBTOTAL			\$376.25
Nodo sensor			
Heltec HTCC-AB02	\$31.00	1	\$31.00
Panel solar 5V	\$7.50	1	\$7.50
Antena SubG 3 dBi 860-930 MHz	\$15.00	1	\$15.00
TP4056 3.7V	\$6.00	1	\$6.00
Batería de lones de litio recargable	\$8.00	1	\$8.00
Jumpers/cables	\$5.00	1	\$5.00
SUBTOTAL			\$72.50
TOTAL			\$ 448.75

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se presentan las conclusiones obtenidas en base los resultados del Capítulo 3. El primer grupo de conclusiones se enfocan en la primera zona de Fresnel relacionadas a las obstrucciones, pérdidas y atenuaciones; un segundo grupo trata sobre los modelos de propagación de múltiples gradientes y el grupo final se enfoca en los coeficientes de correlación en base a los valores RSSI.

Por otra parte, las recomendaciones reflejan en su mayoría mejoras a futuro sobre la implementación y desarrollo del proyecto, aunque también consideran la resolución de inconvenientes presentados en la recolección de datos o procedimientos adicionales sobre la información disponible.

4.1 Conclusiones

- Mediante el análisis de la primera zona de Fresnel y el cálculo del porcentaje de obstrucción debido a diferentes obstáculos en las trayectorias, se halló que los niveles de atenuación en trayectoria A fueron menores a los de trayectoria B y estos dos, a su vez, menores que los de trayectoria C. Esto concuerda con la cantidad de obstrucciones identificadas para B y C (en lo que se considera la bodega y otros árboles) y que, en esta última trayectoria, los nodos se ubicaron de manera más dispersa que las otras hileras.
- En la trayectoria considerada como línea de vista (LOS), definida en el camino entre los cultivos de maíz y cacao de la Figura 2.9, se esperaban los menores casos de atenuación de la señal debido a que los nodos mantenían aparente línea de vista con el Gateway en la zona sin cultivo, sin embargo, se obtuvo lo contrario. Se corroboró luego del análisis de Fresnel y obstrucciones que estas últimas afectaron fuertemente a los dispositivos. Además, la cercanía de una estructura de varillas metálicas (no considerado en cálculo debido a su baja

altura) puede haber influido en la atenuación y el follaje de otras plantaciones cercano a los nodos más alejados. Por esto, esta trayectoria tendría línea de vista parcial mas no LOS.

- De acuerdo con este análisis, se advirtió que tanto el suelo y las estructuras de concreto (bodega) presente en las trayectorias B y C afectaron mayormente la primera zona de Fresnel y atenuaron más la señal que las obstrucciones como árboles (ramas), arbustos y cultivo presentes en todas las trayectorias (véase desde Tabla 3.12 hasta Tabla 3.22). Las atenuaciones presentaron tendencia a disminuir significativamente conforme aumentaba la altura y se reducían porcentajes de obstrucción en un mismo nodo de estudio.
- Los nodos cercanos a la zona de sombra (extensión comprendida entre zona sin cultivo y con cultivo de maíz desde los 100 [m] hasta 125 [m] medidos desde el Gateway), presentaron mayor nivel de atenuación, justificando que esta zona produce una fuerte caída en niveles RSSI y a medida que los dispositivos se alejaron, la cobertura de la señal mejoró.
- Los RSSI en enlaces de subida presentaron mayor dispersión que los medidos en el canal de bajada. Lo mismo podría ser resultado de la asimetría tanto en ganancias de las antenas como en los anchos de banda de los enlaces. El ancho de banda en uplink (125 [KHz]) era 4 veces menor que para downlink (500 [KHz]) por lo que, al concentrarse la potencia de la señal en un rango menor de frecuencias, resultó más propensa a las afectaciones por el entorno.
- Mediante la comparación de las matrices de correlación de las Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8 obtenidas para Parámetros de Cultivo (medidos por Estación meteorológica en GEA-ESPOL) y Parámetros Ambientales de las Tabla 3.9, Tabla 3.10 y Tabla 3.11 (medidos por Estación meteorológica en Tecnologías-ESPOL), se obtuvo que los ambientales presentaron valores casi nulos debido a que el instrumento de medición se encontraba muy alejado de la granja, por lo que los datos climáticos obtenidos denotaban otro entorno o microclima.

- Del estudio de correlaciones, se encontró que los parámetros ambientales denotaron baja o nula influencia sobre los niveles RSSI, independientemente del canal, a diferencia de los parámetros de cultivo (medidos por estación meteorológica de GEA), cuyo nivel de fuerza fluctuó entre correlaciones nulas (entre 0 y ± 0.2), débiles (entre ± 0.2 y ± 0.4) y moderadas (entre ± 0.4 y ± 0.6). Se notó que las correlaciones moderadas se dieron en muy pocos casos y en escenarios donde existía mayor obstrucción por el suelo y la bodega, más las altas contribuciones por árboles y arbusto (véase desde Tabla 3.12 hasta Tabla 3.22).
- En general, en base a los resultados en la Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8, se concluye que las correlaciones resultaron ser “débiles” y en algunas ocasiones “moderadas” debido a afectación por obstrucciones, por lo que no se puede inferir acertadamente que los parámetros de cultivo tengan una incidencia significativa sobre la señal que se propaga.
- Las correlaciones entre RSSI vs temperatura y radiación solar en su mayoría denotaron una relación inversa indicando que, a mayor temperatura y radiación solar se obtienen menores valores RSSI. Por otro lado, la Temperatura depende directamente de la radiación solar. Por el contrario, para RSSI vs % humedad y presión atmosférica se obtuvo una relación directa. Las anomalías se consideraron cuando se invertía el patrón de estos signos debido a cercanía de obstrucciones a los nodos estudiados y la variabilidad del canal analizado.
- Mediante el cálculo de las correlaciones promedio entre RSSI vs parámetros de cultivo a diferentes alturas del nodo, se observó que existía menor variabilidad en el patrón de signos de estos coeficientes cuando los nodos se encontraban a 0.5 [m] del suelo que en los casos de 1 y 2 [m]. Esto podría deberse a que, a una baja altura, el cultivo alrededor crea una especie de ambiente aislado que se ve menos afectado por las variaciones del entorno.

- Se encontró que los niveles de fuerza de los coeficientes de correlación promedio, descritos en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3, no sólo están relacionados al comportamiento de la pérdida de paso (debilitamiento debido a distancia) sino también a una atenuación adicional provocada por la temperatura en el componente electrónico de los dispositivos usados, cuya influencia es baja.
- Los modelos de propagación de múltiples gradientes obtenidos para alturas de los nodos de 0.5, 1 y 2 [m] permitieron la estimación de la cobertura en toda la zona, sin embargo, se encontró que dos gradientes no fueron suficientes para caracterizar un ambiente real en parcelas agrícolas. Esto debido a las irregularidades del terreno y cantidad de obstrucciones en el entorno, mismas que afectaron al gradiente cada cierta distancia recorrida, según el análisis por cortes realizado.
- Para el canal de subida se observó que el gradiente se volvía más positivo a medida que aumentaba la altura de los nodos, no obstante, para el canal de bajada no hubo mejora a una altura de 2 [m]. En este último escenario, mediante el análisis por cortes se identificó un gradiente muy alto durante el primer tramo (véase Figura 3.10) debido a obstrucción completa de la señal para los nodos involucrados. Lo mencionado no ocurrió en los escenarios de 0.5 y 1 [m] de altura del nodo (véase Tabla 3.4), Sin embargo, si estos obstáculos no estuviesen afectando la zona de Fresnel, se hubiera notado la mejora.
- La dispersión en los datos parece no haber afectado considerablemente al gradiente de acuerdo con lo observado en Figura 3.5, Figura 3.7 y Figura 3.10. A pesar de que hubo más dispersión en canal de subida, los gradientes resultaron menores que en el canal de bajada. Esto puede ser resultado de la cercanía entre obstáculos y transmisor en el enlace downlink, sobre todo, de la bodega (estructura de cemento) que representa un bloqueo mayor para la señal debido al material.

- Al comparar los modelos a una altura del nodo de 1 [m] para dos diferentes periodos y planificaciones de tomas de datos (Figura 3.11 y Figura 3.12), se notaron similitudes en el comportamiento del gradiente en zona sin cultivo y en zona de cultivo (consultar Tabla 3.4). Aun así, una mejor caracterización del canal y de la zona se logra con mayor cantidad de nodos desplegados y toma de datos simultánea ya que aportan más información sobre la propagación.

4.2 Recomendaciones

- Para mejorar la planificación de toma de datos, se recomienda que los nodos se ubiquen en coordenadas más apegadas a las trayectorias trazadas con el fin de evitar mayor dispersión y mejorar la caracterización de la trayectoria.
- En el presente proyecto se hizo uso de la Estación Meteorológica ubicada en GEA-ESPOL para medición de los parámetros de cultivo (temperatura, humedad del suelo, radiación solar, barómetro, entre otros). Sin embargo, se mejorarían las lecturas si se implementaran nodos sensores dentro de las plantaciones.
- Es recomendable que, para futuros trabajos, todos los nodos que miden RSSI dentro de la planificación sean colocados durante el mismo periodo de tiempo, para lo cual se requeriría contar con más cantidad de dispositivos. Lo mismo aplica para mediciones de otros parámetros adicionales que requieran la presencia de nodos en lugar de las estaciones meteorológicas, como puede ser la humedad del suelo.
- Un despliegue de nodos sobre la zona de sombra en las parcelas de maíz de GEA permitiría calcular el gradiente del sector y comprender mejor la caída en la cobertura de la señal provocado por las depresiones del terreno y su posterior recuperación a medida que se aleja de la misma.

- Dado que los primeros nodos en zona de cultivo aún están siendo afectados por zona de sombra antes de empezar a notarse una recuperación en niveles de señal, una posible mejora sería extender la zona de sombra de 25 [m] a 40 [m] de tal forma que estos primeros nodos no sean considerados en el cálculo y obtener así un comportamiento en los gradientes más acorde a lo esperado.
- Para brindar mayor peso al análisis del comportamiento de la atenuación, en contraste a la obstrucción, se recomienda implementar el método de dos rayos para cada zona de Fresnel, el cual describe los aportes adicionales por reflexión sobre la señal que llega a cada nodo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. María Sánchez, T. Vayas, F. Mayorga y C. Freire, «Sector Agrícola en Ecuador,» Ambato, 2018.
- [2] M. Viteri Vera y M. Tapia Toral, «Economía ecuatoriana: de la producción agrícola al servicio,» *ESPACIOS*, vol. XXXIX, nº 32, p. 30, 2018.
- [3] A. S. Tanenbaum y D. J. Wetherall, *Redes de Computadoras*, Quinta ed., Juárez: Pearson Educación, 2012, pp. 91-106.
- [4] S. R. Saunders y A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, Segunda ed., Chichester: John Wiley & Son Ltd, 2007.
- [5] A. Ghasemi, A. Abedi y F. Ghasemi, *Propagation Engineering in Radio Links Design*, New York: Springer, 2013.
- [6] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*, New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.
- [7] N. Sabri, S. A. Aljunid, M. S. Salim, R. Kamaruddin, R. B. Ahmad y M. F. Malek, «Path Loss Analysis of WSN Wave Propagation in Vegetation,» de *2013 International Conference on Science & Engineering in Mathematics, Chemistry and Physics*, Malaysia, 2013.
- [8] R. Fernández Martínez, J. Odieres Meré, F. Martínez de Pisón Ascacibar, A. González Marcos, F. Alba Elías, R. Lostado Lorza y A. Pernía Espinoza, *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica*, Logroño: Universidad de la Rioja, 2009.
- [9] A. Förster, *Introduction to Wireless Sensor Networks*, Primera ed., Wiley-IEEE Press, 2016, pp. 1-10.
- [10] M. L. Patten y M. Newhart, *Understanding Research Methods*, Décima ed., New York: Routledge, 2018, pp. 160-162.
- [11] W. C. R. M. Glenn Davis, «Precision Agriculture: An Introduction,» University of Missouri, Columbia.
- [12] «LoRa based intelligent soil and weather condition monitoring with internet of things for precision agriculture in smart cities,» John Wiley and Sons Inc, Da Nang, 2021.

- [13] Y. Yang, «Design and Application of Intelligent Agriculture Service System With LoRa-based on Wireless Sensor Network,» de *2020 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*, Dongying City, 2020.
- [14] S. Li y H. Gao, «Propagation Characteristics of 2.4GHz Wireless,» de *2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology*, Beijing, 2011.
- [15] J. Brinkhoff y H. John, «Characterization of WiFi signal range for agricultural WSNs,» de *23rd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Hanwood - NSW, 2017.
- [16] I. P. P. L. I. L. A. M. C.-E. O. A. F. F. A. V. A. Hicham Klaina, «Deterministic Radio Channel Characterization for Near-Ground Wireless Sensor Networks Deployment Optimization in Smart Agriculture,» de *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020.
- [17] A. Roopnarine y S. Roca, «Internet of Farming: Channel Characterization of Organic Communication Channels,» de *IEEE Pacific Rim sobre comunicaciones, computadoras y procesamiento de señales (PACRIM)*, Victoria, BC, Canadá, 2019.
- [18] M. Vega Botto, «Cámara de Tecnologías de Información y Comunicación (CAMTIC),» 16 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.camtic.org/actualidad-tic/la-agricultura-no-tiene-futuro-sin-el-uso-de-las-tecnologias-digitales/>. [Último acceso: 30 Mayo 2022].
- [19] V. Ayala Rueda, «Agricultura de Precisión como Herramienta para el Desarrollo de la Agricultura en Ecuador,» *Revista Científica Ecuatoriana*, vol. I, n° 1, p. 14, 2015.
- [20] J. C. G. B. B. C. P. A. S. D. R. R. C. M. H. Andrea García-Cedeño, «PLATANO: Intelligent Technological Support Platform for Azuay province Farmers in Ecuador,» de *2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*, 2019.
- [21] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «Hasta el 2021, 5.104 productores se beneficiaron con riego gracias al Proyecto de Irrigación Tecnificada (PIT),» 16 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.agricultura.gob.ec/hasta-el-2021-5-104-productores-se-beneficiaron-con-riego-gracias-al-proyecto-de-irrigacion-tecnificada-pit/>.
- [22] Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca -MAGAP-, «Proyecto de Irrigación Tecnificada para Pequeños y Medianos Productores y Productoras,» 2016.
- [23] J. M. D. I. P. A. J. D. X. A. N. S. D. P. C. C. P. R. Pablo Chacho, «Wireless System for the Control and Real Time Monitoring of Agricultural Areas of Arenillas Canton in Ecuador,» de *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2019.

- [24] A. Vela, «Estudio de la Agricultura de Precisión Enfocado en la Implementación de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) para el Monitoreo de Humedad y Temperatura en Cultivos – Caso de Estudio Hacienda Cabalinus Ubicada en la Provincia de Los Ríos,» *Revista Politécnica*, vol. 38, nº 1, 2016.
- [25] J. Clemente Carriel y R. Haro Guerra, Artists, *Determinación de un model de propagación usando gradiente distancia-potencia en una zona agrícola y su aplicación en una parcela mediante el diseño de riego inteligente*. [Art]. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2021.
- [26] H. Automation, «HT-M01 Mini LoRa Gateway,» [En línea]. Available: https://resource.heltec.cn/download/HT-M01/ht-m01_user_manual.pdf. [Último acceso: 22 Junio 2022].
- [27] H. Automation, «CubeCell Dev-Board Plus,» [En línea]. Available: <https://heltec.org/project/htcc-ab02/#1552557147424-7f1ec-5c652144-e1d638b1-a2e8>. [Último acceso: 26 Junio 2022].
- [28] ART CHIP, «ALLDATASHEET.COM,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1137633/ARTSCHIP/DS1307.html>. [Último acceso: 22 Junio 2022].
- [29] Raspberry Pi, «Raspberry Pi Zero,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero/>. [Último acceso: 18 Junio 2022].
- [30] Raspberry Pi, «Raspberry Pi 2 Model B,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-2-model-b/>. [Último acceso: 18 Julio 2022].
- [31] NEXXT SOLUTIONS, «NEBULA 1200-AC,» [En línea]. Available: https://nexus-connectivity-frontend.s3.amazonaws.com/media/docs/ARN04904U2_MANUAL_ENG_SPA.pdf. [Último acceso: 22 Junio 2022].
- [32] A. I. C. C. T. R. R. Alberto Fassio, MAÍZ: Aspectos sobre fenología, Montevideo: Unidad de Difusión e Información Tecnológica del INIA, 1998.

APÉNDICES

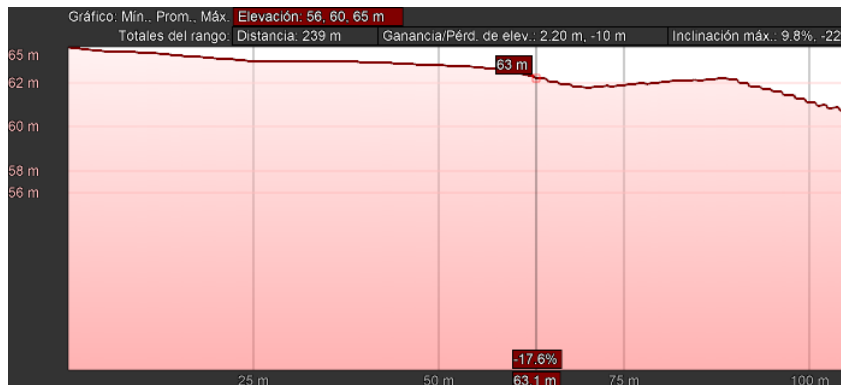


Figura 2.14 Perfil de elevación Radial A

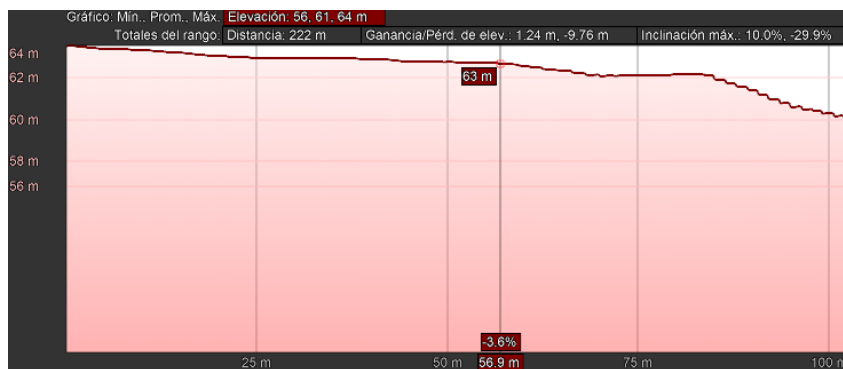


Figura 2.15 Perfil de elevación Radial B

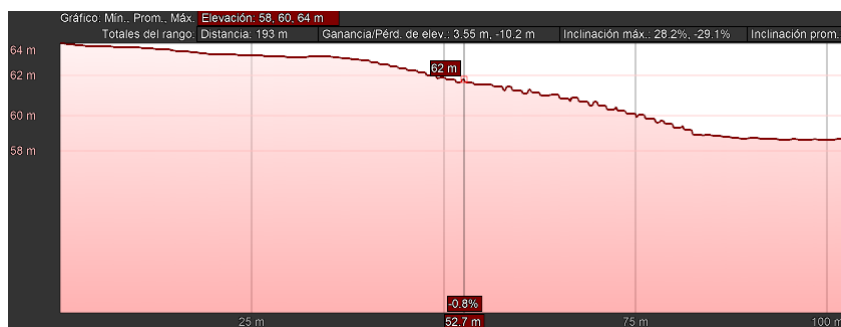


Figura 2.16 Perfil de elevación Radial C

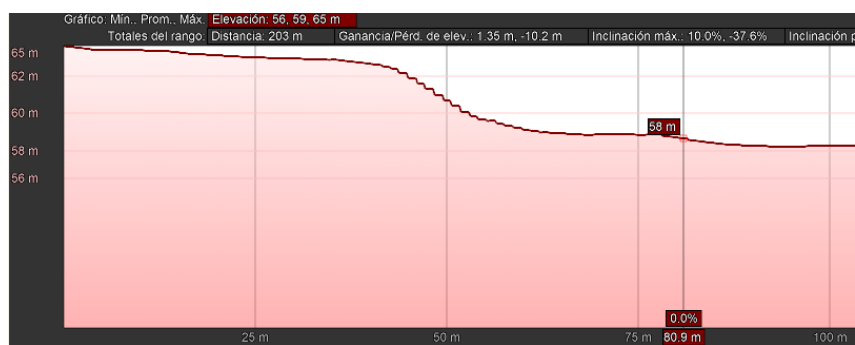


Figura 2.17 Perfil de elevación Radial LOS

Tabla 2. 8 Coordenadas de Nodos en Maíz – Datos RSSI

	RADIAL A		RADIAL B		RADIAL C		RADIAL AB (LOS)		RADIAL LOS	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
c28	-2,13	-79,9638	-2,1388	-79,9636	-2,1388	-79,9631	-2,1396	-79,9629	-2,1387	-79,9627
c27	-2,1389	-79,9638	-2,1389	-79,9635	-2,139	-79,9632	-2,1398	-79,9629	-2,1387	-79,9626
c26	-2,1391	-79,9637	-2,1390	-79,9635	-2,1391	-79,9632	-2,1401	-79,9628	-2,1392	-79,9627
c25	-2,1391	-79,9636	-2,1392	-79,9635	-2,1392	-79,9630	N/A	N/A	-2,1394	-79,9626
c24	-2,1392	-79,9635	-2,1393	-79,9634	-2,1393	-79,963	-2,1402	-79,9627	-2,1396	-79,9626
c23	-2,1393	-79,9635	-2,1393	-79,9633	-2,139341	-79,9622	-2,1404	-79,9625	-2,1400	-79,9625
c22	-2,1393	-79,9634	-2,1394	-79,9632	-2,13939	-79,9628	N/A	N/A	-2,1401	-79,9625

Tabla 2.9 Cronograma de toma de datos RSSI

Cultivo	Maíz	Lecturas				
Altura-Ant	Grupo	Fecha-Inicio	Hora	Fecha-Fin	Hora	Observación
1m	MA	Martes 31 mayo	12h00	Jueves 2 junio	9h00	
	MB	Jueves 2 junio	13h15	Sábado 4 junio	9h00	MB28 dado mantenimiento
	MC	Sábado 4 junio	12h00	Martes 7 junio	10h50	MC25 falla, un día menos de lectura
2m	MC	Martes 7 junio	13h55	Jueves 9 junio	9h00	MC25 dado mantenimiento
	MB	Jueves 9 junio	10h10	Sábado 11 junio	9h00	MB22 falla de dispositivo
	MA	Sábado 11 junio	10h30	Jueves 16 junio	9h00	
		Martes 14 junio				Sin asistencia (Paro nacional)
0,5m	MA	Jueves 16 junio	12h15	Sábado 18 junio	09h30	MB22 dado mantenimiento, restaurados todos
	MB	Sábado 18 junio	11h00	Martes 21 junio	09h30	

	MC	Martes 21 junio	11h00	Jueves 23 junio	9h00	MC25b desplazado por cosecha y poda
Lecturas Ajuste		Jueves 23 junio	10h40	Sábado 25 junio	09h15	
1m	LOS	Sábado 25 junio	11h30	Miércoles 29 junio	08h50	
Lectura de ajuste						
Radial AB segmento desde Gateway				Nuevas lecturas		
CC23: AB23 en posición 1 (frente a Gateway)				MB22 – 0,5m con CC21		
CC24: AB24 en posición 2				MB22 – 2 m con CC22		
CC26: AB26 en posición 3				MC25 – 2 m		
CC27: AB27 en posición 4						
CC28: AB28 en posición 5						

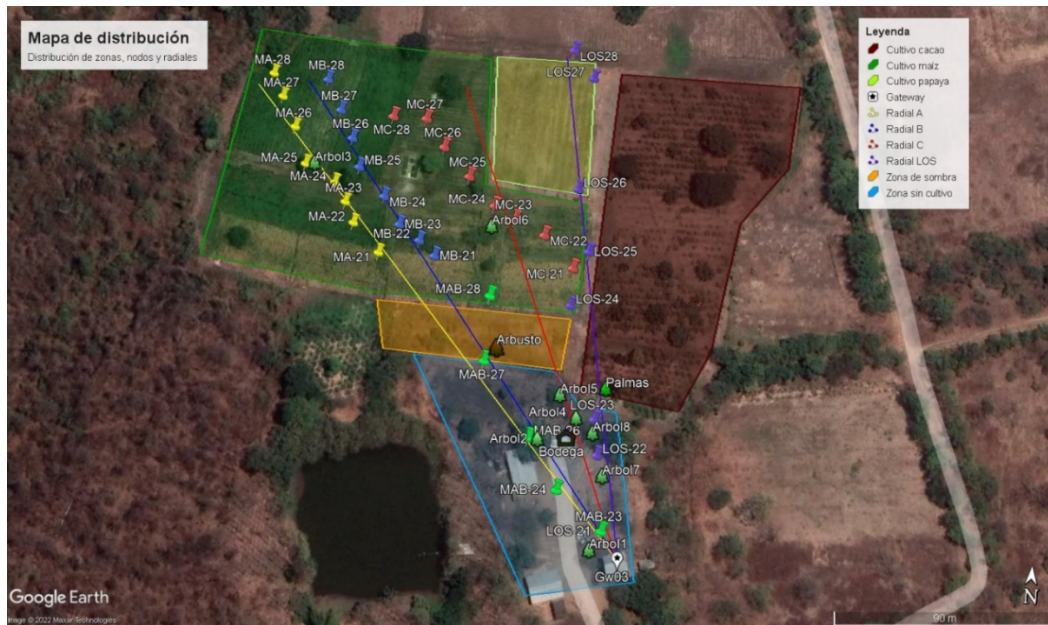


Figura 3.11 Mapa de distribución de nodos y obstrucciones en zonas analizadas de GEA-ESPOL

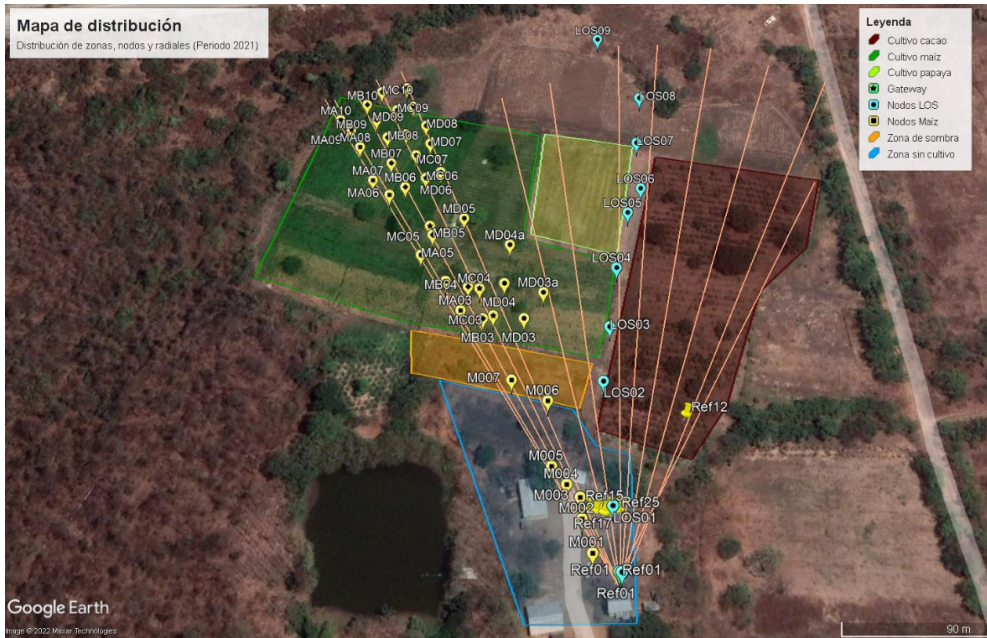


Figura 3.12 Mapa de distribución (2021) de nodos y obstrucciones en zonas analizadas de GEA-ESPOL

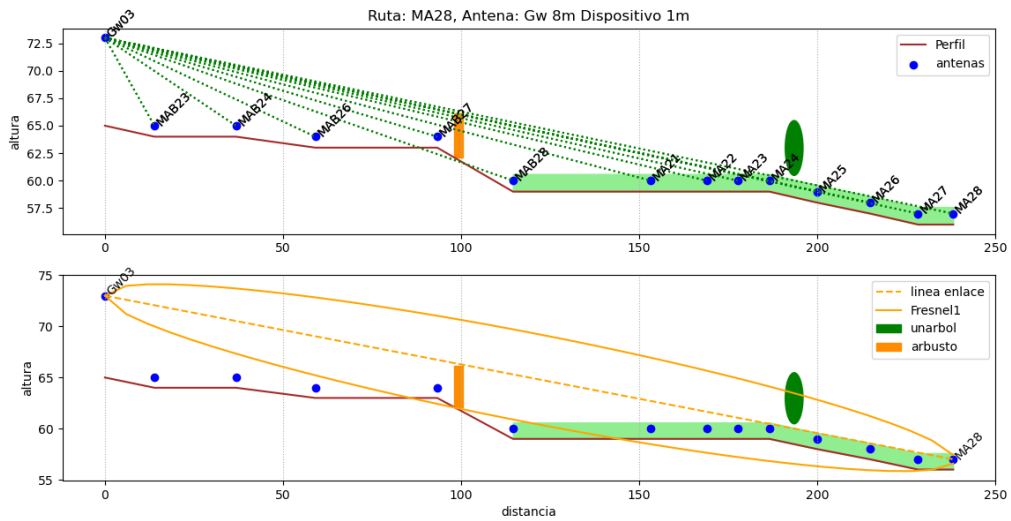


Figura 3.13 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MA-28, altura de 1 [m]

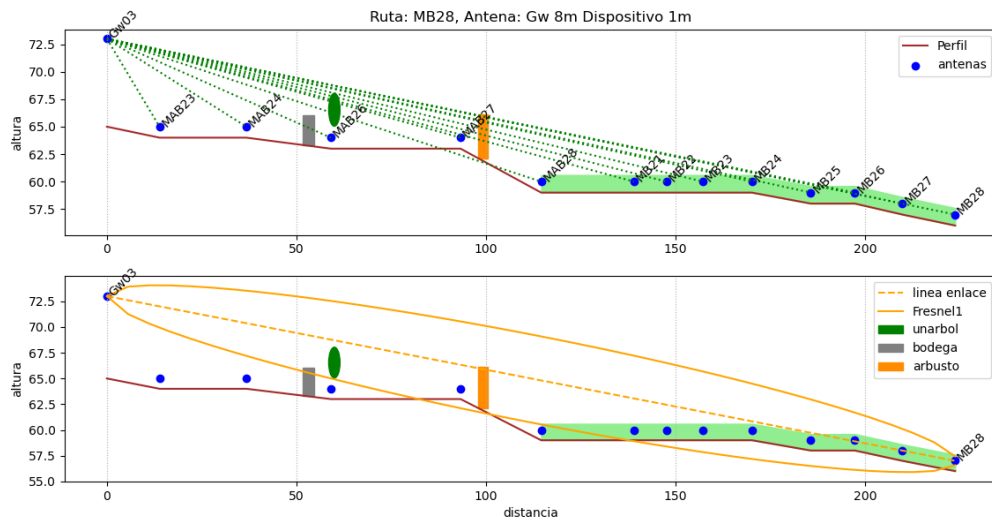


Figura 3.14 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MB-28, altura de 1 [m]

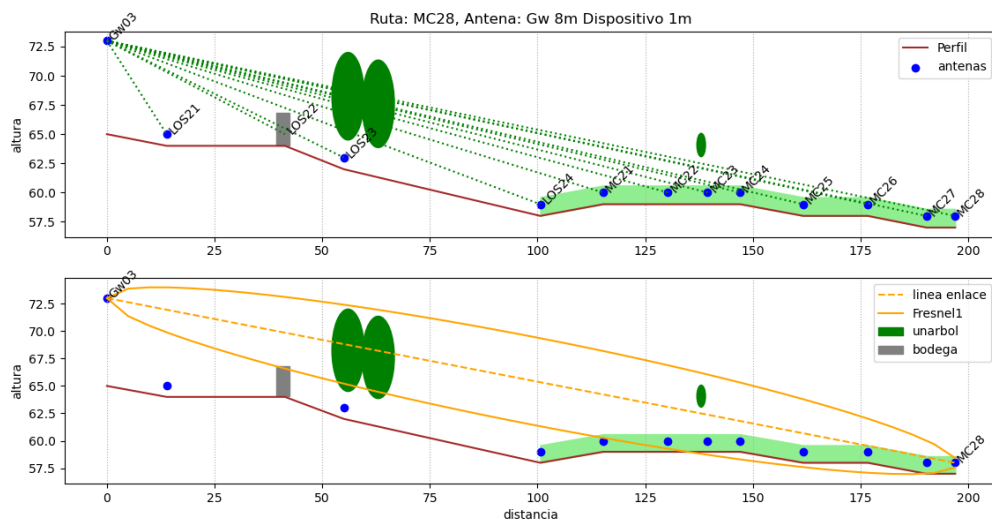


Figura 3.15 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MC-28, altura de 1 [m]

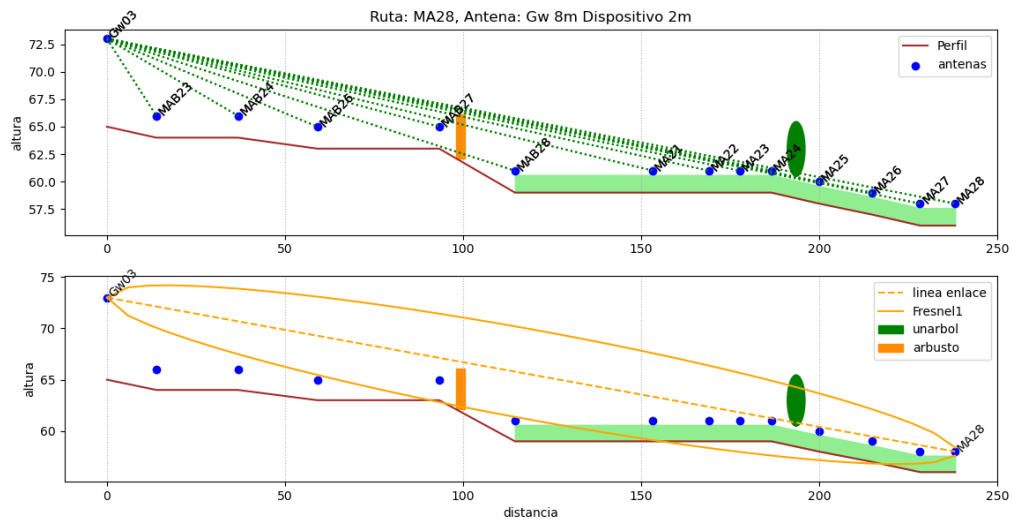


Figura 3.16 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MA-28, altura de 2 [m]

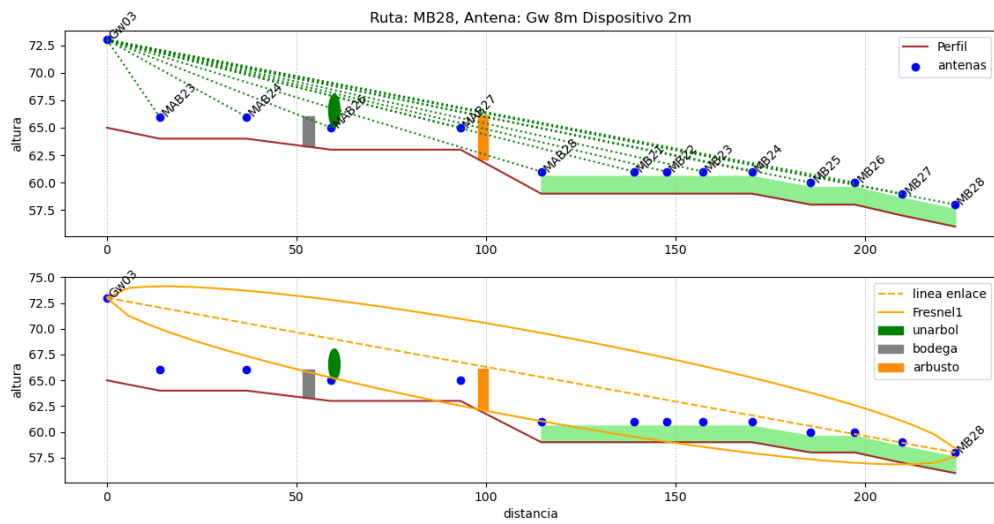


Figura 3.17 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MB-28, altura de 2 [m]

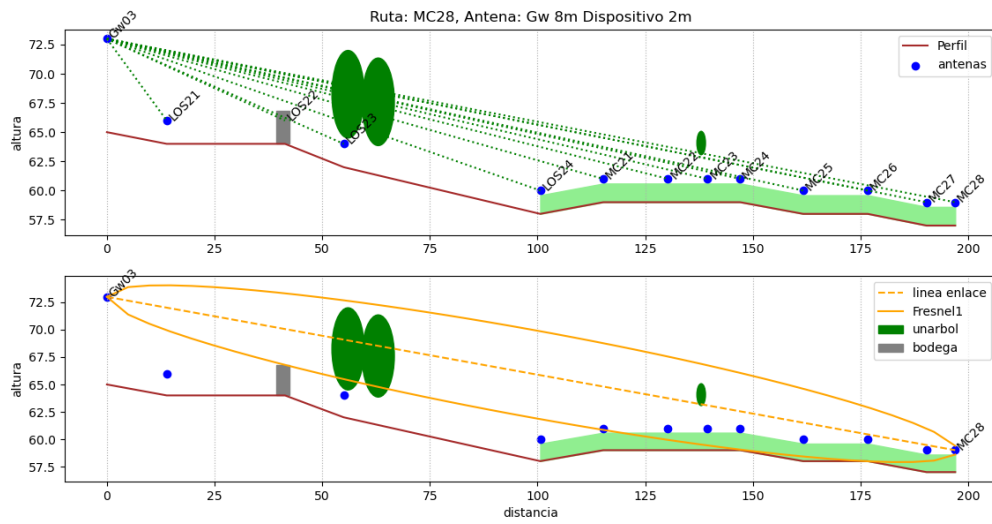


Figura 3.18 Primera zona de Fresnel para nodo de referencia MC-28, altura de 2 [m]

Tabla 3.6 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros de cultivo para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA para una altura del nodo de 0.5 [m]

0.5 [m]	RSSI_UP vs					RSSI_DOWN vs				
	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
MA-21	5,67	0,003	-0,004	0,054	0,061	3,05	-0,1	0,108	-0,182	-0,061
MA-22	3,88	0,083	-0,085	0,063	-0,071	2,6	-0,274	0,287	-0,268	0,287
MA-23	2,03	0,065	-0,058	0,05	-0,034	1,49	-0,414	0,392	-0,28	0,138
MA-24	2,24	-0,161	0,163	-0,105	0,152	1,5	-0,225	0,215	-0,09	0,262
MA-25	2,76	-0,379	0,392	-0,323	0,197	1,63	0,281	-0,254	0,141	-0,24
MA-26	4,64	-0,281	0,277	-0,233	0,125	1,04	-0,508	0,49	-0,439	0,142
MA-27	2,8	-0,005	-0,003	0,099	0,097	4,14	-0,444	0,451	-0,379	0,23
MA-28	4,62	-0,05	0,068	-0,066	0,054	1,57	-0,372	0,365	-0,221	0,185
MB-21	5,89	-0,037	0,043	-0,027	0	1,17	-0,547	0,523	-0,458	0,349
MB-22	5,72	-0,008	-0,028	0	0,011	1,23	-0,101	0,111	-0,182	0,042
MB-23	3,55	-0,425	0,435	-0,418	0,073	1,48	-0,386	0,399	-0,396	-0,021
MB-24	5,04	-0,073	0,075	-0,079	-0,077	4,98	-0,065	0,041	-0,006	0,037
MB-25	3,01	-0,609	0,582	-0,488	0,28	1,8	-0,183	0,191	-0,118	0,15
MB-26	5,08	-0,314	0,306	-0,27	0,137	2,26	0,324	-0,273	0,281	-0,151
MB-27	3,68	0,053	-0,075	0,035	-0,092	0,9	0,028	-0,037	-0,062	-0,07
MB-28	4,33	-0,062	0,059	-0,056	0,056	2,48	0,095	-0,105	-0,026	-0,233
MC-21	4,09	-0,066	0,054	-0,075	-0,009	0,77	-0,04	-0,039	-0,091	-0,047
MC-22	5,05	0,055	-0,055	0,03	-0,023	0,83	-0,242	0,26	-0,235	0,151
MC-23	2,06	-0,073	0,022	-0,153	-0,075	1,48	-0,16	0,137	-0,085	0,082
MC-24	2,04	-0,071	0,054	-0,093	0,003	2,15	0,208	-0,163	0,417	0,19
MC-25	2,7	0,158	-0,242	0,07	-0,214	4,73	0,068	-0,08	-0,006	-0,108
MC-26	2,7	-0,028	-0,039	-0,099	-0,042	4,37	-0,214	0,166	-0,173	0,009
MC-27	2,88	-0,162	0,234	-0,038	0,128	4,07	-0,112	0,081	-0,054	-0,011

MC-28	4,4	0,114	-0,141	0,16	-0,008	5,12	-0,003	0,009	-0,017	-0,003
--------------	-----	-------	--------	------	--------	------	--------	-------	--------	--------

Tabla 3.7 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros de cultivo para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA para una altura del nodo de 1 [m]

1 [m]	RSSI_UP vs					RSSI_DOWN vs				
	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
MA-21	5,81	-0,013	0,020	0,043	0,079	1,29	-0,292	0,218	-0,260	0,043
MA-22	5,48	-0,028	0,062	0,137	0,241	2,5	0,441	-0,414	0,548	-0,058
MA-23	2,92	-0,367	0,273	-0,350	0,066	3,44	-0,158	0,224	-0,270	0,272
MA-24	2,74	-0,172	0,240	-0,140	0,187	3,82	-0,145	0,129	-0,079	0,173
MA-25	4,24	-0,065	0,017	-0,096	-0,022	1,71	-0,135	0,143	-0,128	0,089
MA-26	4,74	0,043	-0,018	0,111	0,101	1,2	0,405	-0,388	0,442	-0,101
MA-27	2,91	0,045	0,046	0,066	0,115	1,81	-0,121	0,099	-0,141	0,063
MA-28	2,51	-0,086	0,098	0,005	0,134	1,27	-0,111	0,015	-0,101	-0,046
MB-21	5,17	0,015	-0,026	0,008	-0,008	1,25	0,058	-0,023	-0,104	-0,113
MB-22	5,28	0,221	-0,253	0,181	0,067	2,37	0,296	-0,277	0,266	-0,078
MB-23	4,92	0,236	-0,334	0,175	0,079	4,29	0,018	-0,062	0,007	0,095
MB-24	2,42	-0,518	0,471	-0,342	0,067	4,79	0,100	-0,147	0,002	-0,048
MB-25	1,7	-0,368	0,456	-0,311	0,086	2,09	-0,206	0,182	-0,057	0,077
MB-26	4,73	-0,106	0,099	-0,078	0,038	4,07	0,160	-0,149	0,113	-0,061
MB-27	4,02	-0,232	0,115	-0,236	-0,078	1,32	-0,087	0,014	-0,197	0,155
MB-28	4,95	-0,021	-0,030	0,014	-0,036	3,35	-0,141	0,056	-0,104	0,153
MC-21	6,05	0,030	-0,044	-0,017	-0,046	1,9	-0,053	0,053	-0,230	-0,125
MC-22	7,68	0,201	-0,416	0,178	-0,207	4,33	0,187	-0,509	0,162	-0,274
MC-23	6,55	-0,246	0,464	-0,311	0,074	2,53	-0,113	0,290	-0,048	0,189
MC-24	2,67	-0,291	0,290	-0,139	0,163	2,42	0,063	-0,073	-0,112	-0,171
MC-25	3,06	-0,091	0,122	-0,036	0,252	1,52	-0,172	0,248	-0,123	0,271

MC-26	5,55	-0,263	0,279	-0,074	0,284	1,94	-0,167	0,163	-0,010	0,259
MC-27	5,16	0,074	-0,248	0,106	-0,065	4,75	0,037	-0,092	-0,002	-0,054
MC-28	4,06	0,115	-0,125	0,054	-0,127	2,95	-0,211	0,229	-0,118	0,203

Tabla 3.8 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros de cultivo para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de GEA para una altura del nodo de 2 [m]

2 [m]	RSSI_UP vs					RSSI_DOWN vs				
	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
MA-21	5,78	-0,008	-0,007	0,030	0,015	0,96	-0,389	0,352	-0,340	0,042
MA-22	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
MA-23	2,54	0,034	-0,036	0,036	-0,005	1,53	-0,143	0,141	-0,136	-0,015
MA-24	2,37	-0,215	0,184	-0,165	0,131	1,59	-0,043	0,068	0,084	0,131
MA-25	3,21	0,092	-0,137	0,188	0,164	1,48	0,157	-0,079	0,244	0,028
MA-26	3,71	0,037	-0,012	0,077	0,008	1,61	0,173	-0,135	0,186	0,021
MA-27	2,27	-0,130	0,054	-0,154	0,006	0,94	-0,114	0,034	-0,134	0,050
MA-28	5,78	-0,045	0,063	-0,004	0,037	0,96	0,098	-0,194	-0,023	-0,093
MB-21	6,12	0,010	-0,001	0,011	-0,012	0,83	-0,248	0,229	-0,287	-0,018
MB-22	3,31	-0,083	0,063	-0,068	-0,041	1,06	-0,464	0,428	-0,369	0,282
MB-23	4,97	0,158	-0,154	0,151	-0,574	1,4	-0,423	0,442	-0,350	0,218
MB-24	6,03	-0,112	0,142	0,034	0,278	3,72	0,063	0,028	0,130	0,102
MB-25	2,14	-0,373	0,363	-0,322	0,010	1,34	-0,182	0,206	-0,185	-0,040
MB-26	2,94	-0,013	0,012	-0,011	0,008	5,77	0,047	-0,057	0,052	-0,387
MB-27	3,77	-0,135	0,120	-0,158	-0,095	2,73	-0,125	0,121	-0,150	-0,072
MB-28	4,15	-0,007	0,015	0,019	-0,035	2,94	-0,142	0,154	-0,165	-0,048
MC-21	5,31	0,007	-0,025	-0,038	-0,001	0,73	-0,116	0,199	0,081	0,172
MC-22	4,55	0,048	-0,116	-0,050	-0,094	0,89	0,072	-0,278	-0,019	0,192

MC-23	2,28	-0,030	-0,111	-0,109	0,025	1,16	-0,370	0,344	-0,215	0,140
MC-24	2,36	-0,112	0,142	0,034	0,278	3,63	0,063	0,028	0,130	0,102
MC-25	5,35	0,233	-0,072	0,176	0,015	4,11	0,010	-0,137	-0,124	-0,057
MC-26	3,44	-0,086	0,002	-0,115	0,060	1,14	-0,159	-0,107	-0,282	0,150
MC-27	4,56	0,059	-0,175	0,000	-0,015	3,39	0,060	-0,037	0,053	0,035
MC-28	4,52	0,083	0,006	0,102	-0,039	2,45	0,067	-0,053	0,043	-0,047

Tabla 3.9 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros ambientales para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de Tecnologías para una altura del nodo de 0.5 [m]

0.5 [m]	RSSI_UP vs					RSSI_DOWN vs				
	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
MA-21	5,67	0,009	-0,013	0,045	0,054	3,05	-0,136	0,145	-0,185	-0,044
MA-22	3,88	0,057	-0,072	0,050	-0,085	2,6	-0,272	0,292	-0,268	0,175
MA-23	2,03	0,070	-0,064	0,042	-0,053	1,49	-0,406	0,382	-0,273	0,204
MA-24	2,24	-0,123	0,150	-0,110	0,170	1,5	-0,225	0,194	-0,044	0,270
MA-25	2,76	-0,383	0,399	-0,321	0,244	1,63	0,272	-0,242	0,113	-0,268
MA-26	4,64	-0,281	0,285	-0,221	0,167	1,04	-0,545	0,521	-0,456	0,216
MA-27	2,8	0,021	-0,033	0,112	0,086	4,14	-0,443	0,459	-0,366	0,291
MA-28	4,62	-0,041	0,066	-0,054	0,068	1,57	-0,358	0,353	-0,220	0,234
MB-21	5,89	-0,035	0,037	-0,024	0,003	1,17	-0,546	0,544	-0,443	0,431
MB-22	5,72	-0,003	-0,021	0,007	0,002	1,23	-0,095	0,115	-0,180	0,061
MB-23	3,55	-0,427	0,437	-0,406	0,164	1,48	-0,404	0,404	-0,393	0,066
MB-24	5,04	-0,075	0,077	-0,085	-0,051	4,98	-0,062	0,045	0,006	0,037
MB-25	3,01	-0,612	0,607	-0,480	0,381	1,8	-0,184	0,193	-0,114	0,182
MB-26	5,08	-0,320	0,311	-0,255	0,188	2,26	0,338	-0,321	0,283	-0,203

MB-27	3,68	0,057	-0,068	0,025	-0,099	0,9	0,016	-0,005	-0,058	-0,063
MB-28	4,33	-0,066	0,070	-0,059	0,067	2,48	0,082	-0,079	-0,044	-0,225
MC-21	4,09	-0,070	0,052	-0,072	0,005	0,77	-0,042	-0,030	-0,085	-0,021
MC-22	5,05	0,049	-0,058	0,027	-0,027	0,83	-0,257	0,253	-0,196	0,187
MC-23	2,06	-0,069	0,039	-0,137	-0,051	1,48	-0,151	0,114	-0,089	0,102
MC-24	2,04	-0,073	0,050	-0,092	0,010	2,15	0,237	-0,232	0,410	0,120
MC-25	2,7	0,178	-0,238	0,076	-0,200	4,73	0,074	-0,084	0,010	-0,087
MC-26	2,7	-0,023	-0,040	-0,091	-0,017	4,37	-0,210	0,158	-0,193	0,035
MC-27	2,88	-0,192	0,225	-0,049	0,116	4,07	-0,114	0,090	-0,071	-0,006
MC-28	4,4	0,140	-0,147	0,159	-0,019	5,12	-0,007	0,011	-0,033	0,007

Tabla 3.10 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros ambientales para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de Tecnologías para una altura del nodo de 1 [m]

1m	RSSI_UP vs					RSSI_DOWN vs				
	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
MA-21	5,81	0,000	0,009	0,042	0,049	1,29	-0,290	0,188	-0,311	0,043
MA-22	5,48	0,016	0,017	0,107	0,137	2,5	0,301	-0,216	0,351	-0,056
MA-23	2,92	-0,203	0,084	-0,241	-0,045	3,44	-0,074	0,113	0,009	0,225
MA-24	2,74	-0,202	0,208	-0,120	0,240	3,82	-0,064	0,059	0,007	0,123
MA-25	4,24	0,005	-0,034	-0,043	-0,084	1,71	-0,028	-0,012	-0,063	-0,025
MA-26	4,74	0,019	0,017	0,075	0,110	1,2	0,208	-0,139	0,252	0,035
MA-27	2,91	0,071	-0,002	0,121	0,087	1,81	-0,037	0,014	-0,039	0,031
MA-28	2,51	-0,074	0,082	-0,010	0,137	1,27	-0,057	-0,040	-0,073	-0,088
MB-21	5,17	0,013	0,013	0,012	0,000	1,25	0,048	-0,036	-0,104	-0,112
MB-22	5,28	0,238	-0,138	0,184	0,021	2,37	0,312	-0,327	0,252	-0,144
MB-23	4,92	0,251	-0,138	0,154	0,032	4,29	0,028	-0,038	0,017	0,080
MB-24	2,42	-0,514	0,450	-0,332	0,178	4,79	0,100	-0,080	0,006	-0,062

MB-25	1,7	-0,394	0,357	-0,311	0,160	2,09	-0,196	0,133	-0,042	0,114
MB-26	4,73	-0,106	0,091	-0,071	0,057	4,07	0,163	-0,177	0,122	-0,093
MB-27	4,02	-0,240	0,147	-0,218	-0,015	1,32	-0,082	0,213	-0,181	0,177
MB-28	4,95	-0,009	-0,010	0,009	-0,030	3,35	-0,123	0,126	-0,112	0,173
MC-21	6,05	0,027	-0,027	-0,019	-0,047	1,9	-0,088	0,098	-0,273	-0,101
MC-22	7,68	0,176	-0,366	0,172	-0,240	4,33	0,155	-0,422	0,155	-0,306
MC-23	6,55	-0,221	0,430	-0,304	0,130	2,53	-0,092	0,179	-0,046	0,196
MC-24	2,67	-0,288	0,235	-0,099	0,193	2,42	0,058	-0,078	-0,126	-0,169
MC-25	3,06	-0,093	0,121	-0,038	0,239	1,52	-0,183	0,218	-0,123	0,287
MC-26	5,55	-0,260	0,249	-0,088	0,303	1,94	-0,161	0,130	-0,015	0,266
MC-27	5,16	0,058	-0,188	0,095	-0,079	4,75	0,034	-0,037	-0,013	-0,050
MC-28	4,06	0,128	-0,089	0,053	-0,133	2,95	-0,203	0,225	-0,102	0,219
MAB-23	1,67	0,003	-0,015	0,013	0,000	1,97	-0,203	0,225	-0,102	0,219
MAB-24	1,41	-0,285	0,288	-0,280	0,196	1,33	-0,325	0,296	-0,307	0,105
MAB-26	4,75	0,003	-0,015	0,013	0,000	1,13	-0,068	0,015	0,013	0,091
MAB-27	2,36	0,100	-0,103	0,100	-0,116	2,72	-0,325	0,296	-0,307	0,105
MAB-28	5	0,008	-0,067	0,063	-0,001	3,62	-0,281	0,182	-0,094	0,160
LOS-21	6,06	-0,027	0,025	-0,025	0,018	1,07	-0,087	-0,025	0,146	0,096
LOS-22	2,41	-0,022	0,021	-0,006	0,022	5,24	-0,321	0,343	-0,275	-0,002
LOS-23	1,86	0,096	-0,090	0,093	-0,061	2,15	-0,086	0,092	-0,062	0,005
LOS-24	1,36	-0,301	0,310	-0,266	0,044	0,98	-0,062	0,070	0,058	0,050
LOS-25	2	-0,394	0,381	-0,345	0,252	1,64	-0,058	0,058	-0,042	0,058
LOS-26	4,88	0,022	-0,019	0,033	-0,025	1,2	-0,188	0,181	-0,129	0,175
LOS-27	2	-0,078	0,105	-0,120	-0,170	1,64	-0,178	0,189	-0,220	0,038
LOS-28	4,82	0,016	0,001	-0,016	-0,125	3,27	-0,096	0,087	-0,145	0,047

Tabla 3.11 Coeficientes de correlación de Pearson entre RSSI vs Parámetros ambientales para el canal de subida y bajada de la estación meteorológica de Tecnologías para una altura del nodo de 2 [m]

2m	RSSI_UP vs					RSSI_DOWN vs				
	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro	σ	Temperatura	% Humedad	Rad Solar	Barómetro
MA-21	5,78	-0,012	0,039	0,003	0,013	0,96	-0,401	0,358	-0,345	0,113
MA-22	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
MA-23	2,54	0,047	-0,041	0,041	0,001	1,53	-0,141	0,140	-0,137	0,023
MA-24	2,37	-0,207	0,201	-0,184	0,163	1,59	-0,033	0,073	0,080	0,123
MA-25	3,21	0,111	-0,155	0,185	0,122	1,48	0,173	-0,084	0,274	-0,002
MA-26	3,71	0,053	-0,013	0,080	0,001	1,61	0,206	-0,141	0,214	-0,009
MA-27	2,27	-0,141	0,097	-0,160	0,031	0,94	-0,109	0,043	-0,141	0,077
MA-28	5,78	-0,053	0,070	-0,016	0,040	0,96	0,087	-0,148	-0,047	-0,088
MB-21	6,12	0,009	-0,008	0,008	-0,013	0,83	-0,268	0,255	-0,281	0,019
MB-22	3,31	-0,078	0,051	-0,062	-0,025	1,06	-0,462	0,450	-0,376	0,328
MB-23	4,97	0,154	-0,137	0,147	-0,081	1,4	-0,418	0,434	-0,343	0,281
MB-24	6,03	0,111	-0,088	0,096	0,011	3,72	-0,241	0,236	-0,228	0,055
MB-25	2,14	-0,383	0,344	-0,318	0,056	1,34	-0,180	0,204	-0,180	0,001
MB-26	2,94	-0,011	0,010	-0,016	0,014	5,77	0,029	-0,031	0,037	-0,046
MB-27	3,77	-0,173	0,157	-0,159	-0,080	2,73	-0,161	0,141	-0,164	-0,052
MB-28	4,15	-0,004	0,001	0,009	-0,036	2,94	-0,143	0,155	-0,166	-0,049
MC-21	5,31	-0,014	0,000	-0,040	0,004	0,73	-0,106	0,155	0,083	0,157
MC-22	4,55	0,084	-0,110	-0,037	-0,085	0,89	0,138	-0,330	-0,003	0,190
MC-23	2,28	-0,018	-0,065	-0,101	0,032	1,16	-0,357	0,285	-0,200	0,168
MC-24	2,36	-0,136	0,120	0,035	0,255	3,63	0,039	-0,023	0,130	0,090
MC-25	5,35	0,177	-0,077	0,191	-0,004	4,11	0,015	-0,077	-0,129	-0,046
MC-26	3,44	-0,086	0,044	-0,124	0,070	1,14	-0,145	-0,017	-0,277	0,165
MC-27	4,56	0,069	-0,167	0,003	-0,014	3,39	0,058	-0,031	0,059	0,023

MC-28	4,52	0,071	-0,033	0,102	-0,038	2,45	0,070	-0,051	0,053	-0,047
--------------	------	-------	--------	-------	--------	------	-------	--------	-------	--------

Trayectoria AB

Tabla 3.12 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria AB a 1 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol1	%obs arbol2	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MAB28_1m	-81	-81,5	114,55	32,6	N/A	86,3	100	43,44	N/A	109	104,5	0,952	0,912
MAB27_1m	-64,35	-78,11	93,3	24,38	N/A	76,71	N/A	N/A	N/A	92,35	101,11	0,990	1,084
MAB26_1m	-56,16	-53,46	59,07	75,41	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	84,16	76,46	1,425	1,294
MAB24_1m	-51,11	-49,89	36,79	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	79,11	72,89	2,150	1,981
MAB23_1m	-50,7	-59,65	13,88	N/A	65,4	N/A	N/A	N/A	N/A	78,7	82,65	5,670	5,955

Trayectoria LOS

Tabla 3.13 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria LOS a 1 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs árbol 1	%obs árbol 7	%obs árbol 8	%obs palmas	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
LOS28_1m	-89,69	-79,48	194,25	N/A	2,76	100	3,98	N/A	N/A	117,69	102,48	0,606	0,528
LOS27_1m	-75,76	-78,44	189,46	N/A	5,05	97,32	4,85	N/A	N/A	103,76	101,44	0,548	0,535
LOS26_1m	-72,87	-73,23	146,61	N/A	12,24	87,25	17,75	N/A	N/A	100,87	96,23	0,688	0,656
LOS25_1m	-62,38	-52,36	121,02	N/A	18,22	79,57	28,79	N/A	N/A	90,38	75,36	0,747	0,623
LOS24_1m	-60,21	-65,29	100,63	N/A	27,73	64,53	55,62	10,4	N/A	88,21	88,29	0,877	0,877

LOS23_1m	-78,44	-63,65	54,99	N/A	36,46	23,73	N/A	19,76	N/A	106,44	86,65	1,936	1,576
LOS22_1m	-51,52	-66,3	41,35	N/A	42,58	N/A	N/A	N/A	N/A	79,52	89,3	1,923	2,160
LOS21_1m	-44,23	-42,19	13,88	87,68	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	72,23	65,19	5,204	4,697

Trayectoria A

Tabla 3.14 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria A a 0.5 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol3	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MA28_50cm	-84,92	-84,71	238,15	N/A	36,9	40	34,61	100	112,92	107,71	0,474	0,452
MA27_50cm	-86,46	-90,73	228,29	N/A	24	44,51	41,27	100	114,46	113,73	0,501	0,498
MA26_50cm	-85,52	-80,26	214,82	N/A	17,88	29,99	41,96	100	113,52	103,26	0,528	0,481
MA25_50cm	-77,97	-72,83	199,92	N/A	N/A	30	40,36	100	105,97	95,83	0,530	0,479
MA24_50cm	-81,23	-74,69	186,53	N/A	N/A	44,44	15,14	100	109,23	97,69	0,586	0,524
MA23_50cm	-75,79	-80,16	177,6	N/A	N/A	32,73	18,43	100	103,79	103,16	0,584	0,581
MA22_50cm	-82,68	-80,76	168,95	N/A	N/A	38,38	17,3	100	110,68	103,76	0,655	0,614
MA21_50cm	-79,53	-70,56	153,28	N/A	N/A	49,07	12,92	100	107,53	93,56	0,702	0,610

Tabla 3.15 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria A a 1 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol3	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MA28_1m	-87,44	-83,28	238,15	N/A	44,8	38,33	30,77	100	115,44	106,28	0,485	0,446
MA27_1m	-87,72	-86,33	228,29	N/A	31,65	40,8	36,52	100	115,72	109,33	0,507	0,479
MA26_1m	-86,18	-81,04	214,82	N/A	29,36	23,71	34,32	100	114,18	104,04	0,532	0,484
MA25_1m	-89,7	-77,02	199,92	N/A	N/A	23,54	28,21	100	117,7	100,02	0,589	0,500
MA24_1m	-82,99	-83,81	186,53	N/A	N/A	41,1	N/A	100	110,99	106,81	0,595	0,573

MA23_1m	-82,49	-83,94	177,6	N/A	N/A	25,83	N/A	100	110,49	106,94	0,622	0,602
MA22_1m	-82,89	-78,04	168,95	N/A	N/A	31,02	N/A	100	110,89	101,04	0,656	0,598
MA21_1m	-81,63	-68,71	153,28	N/A	N/A	39,75	4	100	109,63	91,71	0,715	0,598

Tabla 3.16 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria A a 2 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol3	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MA28_2m	-81,21	-77,22	238,15	N/A	54,5	36,67	21,15	25	109,21	100,22	0,459	0,421
MA27_2m	-79,77	-79,51	228,29	N/A	47,18	23,92	24,57	42,93	107,77	102,51	0,472	0,449
MA26_2m	-77,26	-86,72	214,82	N/A	51,43	11,17	18,8	47,25	105,26	109,72	0,490	0,511
MA25_2m	-82,23	-70,88	199,92	N/A	43,84	10,61	2	44,39	110,23	93,88	0,551	0,470
MA24_2m	-79,97	-76,07	186,53	N/A	N/A	31,94	N/A	30,7	107,97	99,07	0,579	0,531
MA23_2m	-76,47	-77,34	177,6	N/A	N/A	12,02	N/A	24,27	104,47	100,34	0,588	0,565
MA21_2m	-81	-64,89	153,28	N/A	N/A	25,78	N/A	24,88	109	87,89	0,711	0,573
MA28_2m	-81,21	-77,22	238,15	N/A	54,5	36,67	21,15	25	109,21	100,22	0,459	0,421

Trayectoria B

Tabla 3.17 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria B a 0.5 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol2	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuación up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MB28_50cm	-86,57	-86,38	223,78	7,69	44,3	46,75	40,9	100	114,57	109,38	0,512	0,489
MB27_50cm	-83,64	-77,95	209,85	5,1	45,33	32,29	41,64	100	111,64	100,95	0,532	0,481
MB26_50cm	-86,27	-87,11	197,31	4,27	45,24	30,83	23,78	100	114,27	110,11	0,579	0,558
MB25_50cm	-72,78	-72,78	185,69	6,78	47,66	36,71	33,82	100	100,78	95,78	0,543	0,516

MB24_50cm	-94,8	-92,36	170,13	7,88	48,3	37,46	16,25	100	122,8	115,36	0,722	0,678
MB23_50cm	-88,71	-82,43	157,29	13,28	49,92	46,53	13,11	100	116,71	105,43	0,742	0,670
MB22_50cm	-81,05	-67,77	147,6	14,53	51,91	49,13	19,21	100	109,05	90,77	0,739	0,615
MB21_50cm	-73,85	-64,41	139,07	19,64	52,76	58,88	20	100	101,85	87,41	0,732	0,629

Tabla 3.18 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria B a 1 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol2	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuación up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MB28_1m	-90,11	-96,22	223,78	3	44,4	41,77	33,3	100	118,11	119,22	0,528	0,533
MB27_1m	-86,29	-82,6	209,85	2	45,35	29,23	28,46	100	114,29	105,6	0,545	0,503
MB26_1m	-86,6	-92,44	197,31	2	46,06	28,31	14,18	100	114,6	115,44	0,581	0,585
MB25_1m	-68,56	-75,27	185,69	1	47,71	31,78	24,94	100	96,56	98,27	0,520	0,529
MB24_1m	-80,72	-89,09	170,13	N/A	48,69	29,75	N/A	100	108,72	112,09	0,639	0,659
MB23_1m	-93,41	-89,96	157,29	10,31	50,16	38,83	5,1	100	121,41	112,96	0,772	0,718
MB22_1m	-83,71	-76,36	147,6	12,31	52,25	38,76	4,73	100	111,71	99,36	0,757	0,673
MB21_1m	-71,8	-65,57	139,07	18,08	53,28	51,33	14,55	100	99,8	88,57	0,718	0,637

Tabla 3.19 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria B a 2 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs arbol2	%obs arbusto	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MB28_2m	-80,53	-85,25	223,78	N/A	43,53	36,71	14,29	35,71	108,53	108,25	0,485	0,484
MB27_2m	-87,72	-88,8	209,85	N/A	44,61	23,38	10,42	46,2	115,72	111,8	0,551	0,533
MB26_2m	-75,91	-92,73	197,31	N/A	46,08	23	N/A	25	103,91	115,73	0,527	0,587
MB25_2m	-73,74	-68,23	185,69	N/A	48,03	26,16	N/A	40,1	101,74	91,23	0,548	0,491
MB24_2m	-89,55	-79,84	170,13	N/A	48,85	15,58	N/A	23,78	117,55	102,84	0,691	0,604

MB23_2m	-88,21	-77,36	157,29	3	50,98	23,42	N/A	24,3	116,21	100,36	0,739	0,638
MB22_2m	-76,22	-66,67	147,6	4,15	52,39	20,37	N/A	22,11	104,22	89,67	0,706	0,608
MB21_2m	-74,52	-62,67	139,07	9,21	54,1	48,12	2	21,59	102,52	85,67	0,737	0,616

Trayectoria C

Tabla 3.20 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria C a 0.5 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs árbol 4	%obs árbol 5	%obs árbol 6	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MC28_50cm	-82,57	-85,99	196,98	2,3	96,7	94,41	28,17	25,88	100	110,57	108,99	0,561	0,553
MC27_50cm	-78,09	-88,5	190,3	1,96	100	100	28,97	36,67	100	106,09	111,5	0,557	0,586
MC26_50cm	-77,31	-79,43	176,68	4,38	100	100	23,43	16,64	100	105,31	102,43	0,596	0,580
MC25_50cm	-72,29	-75,08	161,67	6,5	100	100	N/A	32,34	100	100,29	98,08	0,620	0,607
MC24_50cm	-82,89	-76,52	147,05	6,53	97,3	98,15	N/A	17,92	100	110,89	99,52	0,754	0,677
MC23_50cm	-76,68	-73,6	139,5	9,41	98,41	97,92	N/A	19	100	104,68	96,6	0,750	0,692
MC22_50cm	-67,88	-62,93	130,3	N/A	94,48	90,05	N/A	11,15	100	95,88	85,93	0,736	0,659
MC21_50cm	-62,97	-51,97	115,26	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	90,97	74,97	0,789	0,650

Tabla 3.21 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria C a 1 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs árbol 4	%obs árbol 5	%obs árbol 6	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MC28_1m	-78,05	-77,4	196,98	1,27	96,01	90,27	28,25	20,88	100	106,05	100,4	0,538	0,510
MC27_1m	-88,76	-92,1	190,3	1,13	97,12	96,25	29,5	24,12	100	116,76	115,1	0,614	0,605
MC26_1m	-92,52	-87,03	176,68	2,15	97,14	94,28	28,88	8,05	100	120,52	110,03	0,682	0,623
MC25_1m	-80,45	-74,64	161,67	2,25	100	100	6,6	19,9	100	108,45	97,64	0,671	0,604
MC24_1m	-79,33	-74,71	147,05	5,15	100	100	N/A	N/A	100	107,33	97,71	0,730	0,664
MC23_1m	-83,68	-78,48	139,5	2,13	99,2	99,16	N/A	N/A	100	111,68	101,48	0,801	0,727
MC22_1m	-75,56	-64,18	130,3	N/A	96,17	95,08	N/A	N/A	100	103,56	87,18	0,795	0,669
MC21_1m	-69,11	-55,33	115,26	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	97,11	78,33	0,843	0,680

Tabla 3.22 Parámetros y valores por tipo de obstrucción para cada nodo en trayectoria C a 2 [m]

Nodo	RSSI_up [dBm]	RSSI_down [dBm]	distancias [m]	%obs bodega	%obs árbol 4	%obs árbol 5	%obs árbol 6	%obs suelo	%obs cultivo	Lp up [dB]	Lp down [dB]	atenuacion up [dB/m]	atenuacion down [dB/m]
MC28_2m	-89,69	-79,48	196,98	N/A	92,13	90,15	28,31	N/A	34,2	117,69	102,48	0,597	0,520
MC27_2m	-86,05	-84,24	190,3	N/A	94,36	93,92	30,76	N/A	40,87	114,05	107,24	0,599	0,564
MC26_2m	-75,93	-77	176,68	N/A	95,98	90,19	31,53	N/A	22,28	103,93	100	0,588	0,566
MC25_2m	-86,42	-76,13	161,67	1,6	100	100	20,77	N/A	37,71	114,42	99,13	0,708	0,613
MC24_2m	-77,92	-77,92	147,05	N/A	100	100	N/A	N/A	25,23	105,92	100,92	0,720	0,686
MC23_2m	-70,87	-67,3	139,5	0,96	100	100	N/A	N/A	21,84	98,87	90,3	0,709	0,647
MC22_2m	-70,76	-63,41	130,3	N/A	100	100	N/A	N/A	22,05	98,76	86,41	0,758	0,663
MC21_2m	-69,08	-52,16	115,26	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,12	97,08	75,16	0,842	0,652