



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Utilización de dispositivos IoT para la medición de la
humedad del suelo

Autor

Miguel Sánchez Bruno

Director/es

Dr. Julio Alberto Sangüesa Escorihuela

Dr. Vicente Torres Sanz

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

2023/24



RESUMEN

La agricultura enfrenta desafíos complejos, como la gestión eficiente del agua y la detección temprana de plagas y enfermedades. Teniendo esto en cuenta, este proyecto tiene como misión diseñar e implementar un prototipo que integre sensores de bajo coste para medir la humedad del suelo utilizando la tecnología de comunicación LoRaWAN en el contexto de la Agricultura 4.0. La red LoRaWAN permite recolectar datos y transmitirlos a una plataforma centralizada, ayudando a los agricultores a tomar decisiones informadas.

Además de evaluar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos, se ha utilizado una impresora 3D con el objetivo de crear un prototipo que permita proteger los componentes electrónicos ante condiciones ambientales que aparecen en entornos agrícolas. Finalmente, se ha desarrollado una aplicación web que permite analizar los despliegues realizados o hacer simulaciones, permitiendo evaluar la cobertura entre nodos y gateways, con el fin de determinar zonas óptimas de despliegue de los dispositivos en entornos reales, teniendo en cuenta la orografía.

Los resultados demuestran que es posible medir la humedad del suelo mediante dispositivos IoT utilizando redes LoRaWAN, optimizando el uso de recursos y mejorando la productividad agrícola de manera sostenible.

PALABRAS CLAVE

Sensores, Agricultura 4.0, Humedad de Suelo, LoRa, LoRaWAN, LPWAN, IoT, Diseño 3D, Fresnel

ABSTRACT

Agriculture faces complex challenges, such as efficient water management and early detection of pests and diseases. With this in mind, this project aims to design and implement a prototype that integrates low-cost sensors to measure soil moisture using LoRaWAN communication technology in the context of Agriculture 4.0. The LoRaWAN network allows for data collection and transmission to a centralized platform, helping farmers make informed decisions.

In addition to evaluating the accuracy and reliability of the obtained data, a 3D printer has been used to create a prototype that protects the electronic components from environmental conditions encountered in agricultural settings. Finally, a web application has been developed to analyze the deployments carried out or run simulations, allowing for the evaluation of coverage between nodes and gateways, in order to determine optimal deployment areas for the devices in real-world environments, taking into account the terrain.

The results demonstrate that it is possible to measure soil moisture using IoT devices with LoRaWAN networks, optimizing resource use and improving agricultural productivity in a sustainable manner.

KEYWORDS

Sensors, Agriculture 4.0, Soil Moisture, LoRa, LoRaWAN, LPWAN, IoT, 3D Design, Fresnel

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción, motivación y objetivos.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Motivación	2
1.3	Objetivos	3
2.	Estado del arte	4
2.1	Utilización de dispositivos IoT	4
2.2	Herramientas para la validación de despliegues IoT.....	5
3.	Medición de la humedad del suelo	7
3.1	Sensores	7
3.2	Análisis cualitativo.....	8
3.3	Pruebas.....	11
3.3.1	Entorno de pruebas.....	11
3.3.2	Resultados	12
4.	Hardware IoT.....	15
4.1	Heltec WiFi LoRa 32 v3.....	15
4.2	Gateway LoRa:.....	17
5.	Diseño 3D	19
5.1	Hardware y software.....	19
5.2	Requisitos técnicos.....	22
5.3	Modelado 3D.....	22
5.4	Validación del diseño 3D	24
5.5	Prototipo final	26
6.	Comunicaciones	28
6.1	LoRaWAN	28
6.2	Fresnel	31
6.3	FresSim	32
6.3.1	Tecnologías utilizadas.....	34
6.3.2	Comparativa de la resolución de las APIs de elevación	36
6.3.3	Pruebas de la herramienta	37
7.	Conclusiones.....	40
8.	Bibliografía	41
	Anexo I: Creación del módulo principal	I
	Anexo II: Creación del módulo de sensores	VIII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sensor SHT30.....	8
Figura 2. Sensor Capacitivo Moisture v2.0.....	8
Figura 3. Sensor SZYTF.....	9
Figura 4. Sensor HM1500LF.....	9
Figura 5. Maceta de pruebas.....	12
Figura 6. Datos recogidos durante la prueba 1.....	13
Figura 7. Datos obtenidos en la prueba 2	13
Figura 8. Microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3	16
Figura 9. Gateway RAK7289V2/RAK7289CV2 WisGate Edge Pro	18
Figura 10. Impresora 3D Bambu Lab X1-Carbon	20
Figura 11. Boceto del prototipo 1	23
Figura 12. Boceto del prototipo 2	23
Figura 13. Boceto del prototipo 3	24
Figura 14. Diseño 3D del boceto	25
Figura 15. Clasificación de protección frente a agua	26
Figura 16. Prototipo final	27
Figura 17. Arquitectura LoRaWAN	29
Figura 18. Cálculo de Fresnel	31
Figura 19. Arquitectura de FresSim.....	33
Figura 20. Resolución entre dos puntos.....	36
Figura 21. Pantalla de FresSim donde se representa el despliegue de la prueba.....	37
Figura 22. Perfil y zona Fresnel entre dispositivo y Gateway con 0% de ocupación	38
Figura 23. Perfil y zona Fresnel entre dispositivo y Gateway con 6% de ocupación	38
Figura 24. Perfil y zona Fresnel entre dispositivo y gateway con 63,34% de ocupación	39
Figura 25. Prototipo inicial	I
Figura 26. Modificación de la base en altura	II
Figura 27. Modificación de la base plana.....	II
Figura 28. Modificación del largo	II
Figura 29. Modificación en la anchura de la pared	III
Figura 30. Colocación de elementos	III
Figura 31. Elementos a perforar.....	IV
Figura 32. Perforaciones sobre el prototipo	IV
Figura 33. Modulo base agujereado	V
Figura 34. Biselado en el prototipo	V
Figura 35. Operaciones booleanas.....	VI
Figura 36. Prototipo con ventana.....	VI
Figura 37. Prototipo final 3D	VII
Figura 38. Creación rosca	VIII

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los sensores propuestos	10
Tabla 2. Especificaciones Técnicas del Heltec WiFi LoRa 32 v3	17
Tabla 3. Especificaciones técnicas de Bambu Lab X1-Carbon	20
Tabla 4. Comparativa de las propiedades de las diferentes APIs de elevación	34

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Distancia radial de Fresnel	31
---	----

1. Introducción, motivación y objetivos

En este capítulo se presenta una introducción de los conceptos y tecnologías abordadas en este Trabajo de Fin de Grado (TFG). A continuación, se expone la motivación del proyecto, y finalmente, se exponen los objetivos.

1.1 Introducción

La incorporación de tecnologías digitales en todos los sectores de la actividad humana está cambiando la forma en que interactuamos con el mundo. Las tecnologías facilitan la gestión y optimización de procesos en ámbitos tan diversos como la infraestructura urbana y las cadenas de suministro. En el sector agrícola también están llegando este tipo de innovaciones y consecuentemente, se está convirtiendo en un sector cada vez más digitalizado. De esta manera nace el concepto de agricultura 4.0, que utiliza tecnologías de información y comunicación para mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad de la producción agrícola.

El Internet de las Cosas (IoT) es un sistema de dispositivos interconectados equipados con sensores y tecnología de procesamiento de datos que permite recoger y transmitir datos a través de la red. En el ámbito de la agricultura 4.0, el IoT está transformando radicalmente la forma en que se abordan los desafíos agrícolas, aprovechando la conectividad de dispositivos y sensores para monitorizar y gestionar de manera precisa las condiciones del suelo, el clima y el crecimiento de cultivos, consiguiendo aumentar la productividad y la eficiencia en el riego.

La recopilación de datos de manera remota es una de las utilidades más destacadas del IoT en la agricultura moderna. Gracias a la proliferación de sensores y dispositivos conectados, los agricultores pueden monitorizar en tiempo real distintas variables que pueden ser útiles para la producción agrícola, como la humedad del suelo, la temperatura, niveles de CO₂, luminosidad, nutrientes y la calidad del aire, para determinar la salud de los cultivos. Esta capacidad de obtener datos de manera remota es esencial, ya que permite a los agricultores tomar decisiones basadas en datos precisos y actualizados sin tener que estar físicamente presentes en cada ubicación de cultivo. Además, la recopilación remota de datos facilita la detección temprana de problemas, como la necesidad del riego, enfermedades o plagas, lo que permite una respuesta más rápida y eficaz. Esto se traduce en una gestión más eficiente de los recursos, una mayor productividad y, en última instancia, una mejora de la rentabilidad en el sector agrícola, contribuyendo así a la agricultura 4.0 y a la sostenibilidad de la producción de alimentos a nivel global. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías tienen un coste elevado, lo que impide su adopción generalizada. Muchos agricultores no pueden permitirse la inversión inicial ni los costes de mantenimiento, lo que limita la implementación de estas soluciones a gran escala.

Este nuevo paradigma agrícola busca mejorar la eficiencia, sostenibilidad y productividad en la producción de alimentos a través de la aplicación de tecnologías de vanguardia. Uno de los componentes clave en la evolución es la implementación de sistemas de Long Range (LoRa), una tecnología de comunicación de largo alcance y baja potencia fundamental en la monitorización y gestión de los datos agrícolas.

Sobre la tecnología LoRa, se construye Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), que aprovecha la eficiencia de LoRa y la extiende para crear redes de comunicación más amplias y robustas. Estas redes facilitan la conexión de múltiples dispositivos, distribuidos en amplias áreas geográficas, lo que la convierte en una solución idónea para el entorno agrícola. En este contexto, este TFG propone la utilización de LoRaWAN en la Agricultura 4.0, donde se combina la eficiencia de comunicación inalámbrica con sensores de bajo coste para optimizar los procesos agrícolas.

La implementación de una red LoRaWAN permite la recolección de datos precisos y su transmisión a una plataforma centralizada, donde los agricultores y técnicos pueden acceder a la información que permita la toma de decisiones informadas. Esto facilita la automatización de tareas, el ahorro de recursos y la optimización de la producción agrícola.

1.2 Motivación

La gestión eficiente de los recursos naturales y la agricultura sostenible son elementos imprescindibles para abordar problemas ambientales y alimentarios, especialmente en un contexto donde el cambio climático promueve fenómenos como las sequías, que cada vez son más frecuentes y severas. Éstas ponen en riesgo la disponibilidad de agua, un recurso esencial en la agricultura, y en consecuencia para la seguridad alimentaria mundial.

Dadas las circunstancias actuales, la agricultura de precisión se muestra como una alternativa interesante para los agricultores de manera que puedan optimizar recursos como el agua y los fertilizantes mediante la utilización de sensores. Estos elementos recogen y procesan datos en tiempo real haciendo que el agricultor conozca las condiciones reales del suelo y pueda aplicar tratamientos específicos y precisos para reducir el desperdicio de los recursos y aumentar la eficiencia.

Como posible solución, en este trabajo se presenta un prototipo basado en tecnología LoRa que realiza la monitorización de dos de los parámetros clave en el crecimiento de cultivos y la sostenibilidad de los ecosistemas, como es la humedad del suelo y la temperatura. Este prototipo no solo es capaz de monitorizar de manera eficaz, sino que también utiliza dispositivos de bajo coste, haciendo que la adopción de esta tecnología sea accesible y financieramente viable para los agricultores. Además, aprovecha la tecnología de comunicación de largo alcance y bajo consumo, LoRaWAN, para garantizar una cobertura eficiente en entornos agrícolas amplios y variados.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la monitorización de la humedad del suelo utilizando un prototipo de bajo coste. Se busca desarrollar un prototipo efectivo y accesible y económico, con la finalidad de proporcionar a los agricultores una herramienta que les permita tomar decisiones para mejorar la productividad y sostenibilidad de sus cultivos. Para ello, se han establecido dos objetivos:

El primero es la medición de humedad del suelo en cultivos mediante dispositivos de bajo coste. Para ello, será necesario:

- Determinar el sensor más adecuado: realizar un estudio para seleccionar los sensores de humedad del suelo que mejor se adapten a las necesidades del proyecto, considerando factores como precisión, coste, durabilidad y facilidad de integración con el sistema.
- Diseñar el encapsulado del prototipo: diseñar un encapsulado protector para el prototipo, asegurando que los componentes electrónicos estén resguardados de las condiciones ambientales en entornos agrícolas, como la humedad, el polvo o las variaciones de temperatura, garantizando así la durabilidad y operatividad a largo plazo del dispositivo.

El segundo objetivo es la optimización de los despliegues, para asegurar que el sistema de monitorización funcione de manera eficiente y confiable en un entorno agrícola amplio. Se llevaron a cabo:

- Analizar la eficacia y alcance: evaluar la eficacia y el alcance de la red LoRaWAN en entornos agrícolas para garantizar que la cobertura y la conectividad sean adecuadas. Este análisis ayudará a optimizar la implementación de la red, asegurando una comunicación continua y eficiente entre los dispositivos y el Gateway.
- Desarrollar una aplicación web: desarrollar una aplicación web para facilitar el despliegue del sistema. Esta herramienta permite analizar la viabilidad de los despliegues y verificar la cobertura entre los dispositivos y el Gateway, teniendo en cuenta la orografía del terreno. La aplicación web agiliza el proceso de despliegue, asegurando una implementación más rápida y efectiva.

2. Estado del arte

El panorama actual de la agricultura inteligente se encuentra en constante evolución, impulsado por avances tecnológicos y la creciente necesidad de optimizar la producción agrícola en un contexto de crecimiento demográfico y cambio climático. En este contexto, se presentan un conjunto de trabajos relacionados con la agricultura inteligente, divididos en dos secciones, una primera en el que se presentan diversas aplicaciones usadas para la monitorización de dispositivos de bajo coste, y una segunda en la que se muestran distintas herramientas para el análisis de la cobertura inalámbricas.

2.1 Utilización de dispositivos IoT

Un ejemplo de la monitorización en la agricultura 4.0 es el presentado por Opeyemi et al. [1] en el que los investigadores proponen una solución para tener un seguimiento del nivel de humedad del suelo de manera eficiente, precisa y económica. Para ello utilizan un monitor de humedad de suelo basado en Arduino Uno y un módulo WiFi, que recolectan y envían los datos recogidos a un teléfono. En caso de que los valores predefinidos por el usuario/agricultor superen o disminuyan el umbral establecido previamente, el sistema notificará al agricultor, indicando un riego excesivo o insuficiente. Los autores concluyen con que la medición de los datos es consistente con los datos tomados, por lo que el agricultor puede determinar perfectamente el estado del terreno respecto a la humedad del suelo. A diferencia de nuestra propuesta en el artículo se utiliza WiFi para la transmisión de la información, cuyo alcance es limitado en comparación con LoRa, que es capaz de transmitir a grandes distancias.

Por otro lado, Subhra et al. [2] presentan un trabajo en el que se despliega una red IoT de largo alcance y bajo consumo energético para poder monitorizar la humedad del suelo utilizando una arquitectura de nodos de bajo consumo y la utilización de los servicios basados en nube. Los investigadores concluyen que LoRa es la mejor opción para este tipo de despliegues y finalmente realizan una estimación de costes para demostrar la rentabilidad y viabilidad del proyecto para los agricultores. Este trabajo sustenta la elección de la red seleccionada para este TFG, en el que también se monitoriza la temperatura del suelo.

Fahim et al. [3] postulan una solución para conseguir una red inalámbrica para la medición de la humedad del suelo. Esta investigación ha utilizado tecnología LoRa y radiofrecuencias que permiten que un vehículo aéreo no tripulado (UAV) recoja datos de sensores capacitivos (aquellos sensores que miden a través de cambios en la capacitancia eléctrica) de humedad del suelo. Los resultados de este trabajo comentan el éxito de la comunicación debido a la poca cantidad de paquetes perdidos a grandes distancias sin influir la altura del dron.

En el siguiente trabajo, Rubén Oliveira et al. [4] plantean realizar un estudio para evaluar la tecnología Low Power Wide Area Network (LPWAN), centrándose en su alcance, las propiedades de calidad de la señal y el rendimiento en la entrega de datos. El trabajo explora tres escenarios distintos, uno rural y dos urbanos. Los resultados obtenidos con las pruebas que se han realizado son de un alcance máximo de comunicación de 5660 metros para un escenario rural y sobre los 2000

metros para el entorno urbano. La investigación concluye destacando tres factores para el rendimiento de la tecnología LoRa: la distancia, la diferencia de elevación y los obstáculos en la trayectoria de la señal.

Por último, en Sandra Sendra et al. [5], se aborda la problemática de la detección temprana de incendios. Analizando el riesgo, se podría llegar a reducir el número de incendios originados por accidente o por descuido de los usuarios. Este artículo presenta una red de bajo coste basada en LoRa en la que de forma autónoma se evalúa el riesgo de incendios, así como la presencia de un incendio forestal en zonas rurales. Los resultados de este sistema concluyen que con un nodo cada 4 km en un área circular es la distancia a cubrir con un único Gateway.

Como conclusión, los estudios mencionados consolidan la elección de la red LoRaWAN para este TFG, demostrando su eficacia en aplicaciones de agricultura inteligente y gestión de riesgos ambientales, LoRa es eficaz en proporcionar comunicación confiable en variados entornos, tanto rurales como urbanos.

2.2 Herramientas para la validación de despliegues IoT

En el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, se han desarrollado múltiples herramientas que han contribuido mayoritariamente a la evolución de este campo. Este segmento del estado del arte examina las herramientas más relevantes, especialmente aquellas diseñadas para simular comportamientos de comunicación y analizar la propagación de señales y del perfil del entorno entre emisores y receptores.

Por ejemplo, HeyWhatsThat [6] es una aplicación web encargada de representar la elevación entre dos puntos, la línea de visión o en inglés Line of Sight (LoS) y la zona de Fresnel.

Otra herramienta interesante es ArcGIS Pro [7], una potente aplicación de sistemas de información geográfica que permite el análisis de los datos tanto en entornos rurales como urbanos, ya que cuenta con elementos de trazado de trayectos, tiene en cuenta la altura de los edificios, etc.

Por otro lado, Solwise [8] es una empresa del sector de las telecomunicaciones que proporciona una herramienta para poder ver la orografía y la LoS entre dos localizaciones.

Por su parte, SCADACore [9] permite representar la orografía del terreno e identificar los obstáculos naturales y artificiales, como árboles o edificios, pero en ambos casos, no representan la zona de Fresnel.

Finalmente, Radio Mobile [10] es un software que permite realizar simulaciones de cobertura y propagación de señales inalámbricas. Más en detalle, permite representar la LoS, los datos de transmisión y simular zonas de cobertura más o menos favorables, siendo una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la planificación de redes. Sin embargo, se trata de una aplicación desarrollada en Delphi, por lo que únicamente es posible ejecutarla desde entornos Windows. Su interfaz es compleja y aunque en este caso la aplicación es capaz de representar la zona Fresnel, no proporciona el porcentaje de ocupación de la misma.

A diferencia de nuestra herramienta, ninguna de las herramientas anteriores calcula el porcentaje de ocupación de la zona de Fresnel. Sin embargo, esta métrica es esencial para la simulación de despliegues futuros, ya que va a permitir estimar si existe comunicación entre los dispositivos y Gateways.

3. Medición de la humedad del suelo

Debido a la necesidad de mejorar la agricultura de precisión se propone el diseño e implementación de un prototipo de bajo coste que permite la monitorización de la humedad del suelo.

Este capítulo, dividido en tres partes, se centra en la obtención del sensor idóneo para monitorizar la humedad de suelo. En la primera parte, se exponen los beneficios de la utilización de sensores en la agricultura. A continuación, se realiza un análisis cualitativo de los sensores. En la parte final, se presentan las pruebas, conociendo el entorno y los materiales utilizados, finalmente se exponen los resultados y, en base a estos, se determina el sensor seleccionado para el prototipo.

3.1 Sensores

La digitalización y la aplicación de tecnologías emergentes en la agricultura 4.0 están en continua evolución. Uno de los principales aspectos que posibilitan esta evolución es la medición precisa de la humedad relativa del suelo, una métrica clave para optimizar la producción agrícola y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

Primero, se discutirá la importancia de la humedad del suelo, aspecto que influye en procesos biológicos y químicos fundamentales para el crecimiento de los cultivos. Facilita la disolución de los nutrientes, ayuda durante la fotosíntesis y la transpiración de los cultivos, además de favorecer el crecimiento radicular o la actividad microbiana necesaria para que las plantas absorban nutrientes.

El uso de sensores de humedad relativa en el suelo permite una monitorización constante, facilitando así la labor de riego. Al disponer de información precisa sobre el nivel de humedad, se puede determinar el momento y la cantidad de agua necesaria de manera más eficaz. Esto ayuda a prevenir tanto el riego excesivo como el insuficiente, asegurando que las necesidades hídricas específicas se satisfacen para cada tipo de cultivo.

En los últimos años, hemos sido testigos de fenómenos climáticos extremos como sequías e inundaciones, que afectan directamente la disponibilidad y distribución del agua. En situaciones de sequía, la implementación de sensores de humedad es vital para maximizar la eficiencia en la gestión del agua, permitiendo una respuesta adecuada a estas condiciones adversas.

Después de destacar la importancia de la medición de la humedad relativa del suelo en el contexto de la agricultura 4.0, aparece la necesidad de seleccionar el sensor más adecuado para este proyecto. Durante la búsqueda de los sensores, se encuentra una gran variedad de dispositivos de bajo coste en el mercado. Por esto, es necesario realizar un estudio entre los sensores seleccionados como candidatos para escoger el que mejor se adapte a las necesidades específicas de este proyecto. Para ello, se van a analizar diferentes marcas y modelos, teniendo en cuenta factores como la precisión de la humedad, durabilidad, consumo de los dispositivos, rangos de humedad, sin olvidar el enfoque de la propuesta, es decir, con un bajo coste.

3.2 Análisis cualitativo

A continuación, se procede a la presentación de un conjunto de modelos seleccionados para analizarlos. Éstos serán sometidos a diferentes pruebas para determinar cuál de ellos ofrece el mejor rendimiento y se ajusta óptimamente a las necesidades del proyecto.

- SHT30: el sensor de la Figura 1 destaca por su alta precisión ($\pm 0.05^\circ\text{C}$ para temperatura y $\pm 3\%$ para humedad), bajo consumo energético (0.5 mA), y un amplio rango de medición (-40°C a 125°C para temperatura y 0-100% para humedad). Su robustez y bajo coste (2-3€) lo convierten en una opción ideal para aplicaciones donde la precisión y la economía son críticas.



Figura 1. Sensor SHT30

- Sensor Capacitivo Moisture v2.0 (Figura 2): con su capacidad para resistir la corrosión y moderada resistencia al agua, este sensor ofrece una opción económica (0.75 €) para medir la humedad, aunque con menor precisión ($\pm 5\%$). Este sensor es adecuado para aplicaciones donde las demandas de precisión son más flexibles.



Figura 2. Sensor Capacitivo Moisture v2.0

- Sensor SZYTF: en la Figura 3 se muestra el sensor SZYTF, el más económico de la selección (0.45 €), pero con la menor precisión y durabilidad. Su variabilidad en la precisión (20-90% para humedad) limita su utilidad en aplicaciones críticas.



Figura 3. Sensor SZYTF

- HM1500LF: el último sensor seleccionado, visible en la Figura 4 ha sido el HM1500LF, sensor detectivo que cuenta con una gran precisión, pero un coste algo más elevado que los otros. En consecuencia, lo hace menos viable para implementaciones a gran escala donde el presupuesto es una consideración importante.



Figura 4. Sensor HM1500LF

Después de presentar los sensores, se adjunta la Tabla 1 en la que se detallan las especificaciones técnicas de estos.

Característica\Sensor	SHT30	Sensor Capacitivo Moisture v2.0	Sensor SZYTF	HM1500LF
Precisión de la Temperatura	0.05	N/A	N/A	0.05
Rango de Temperatura (%)	-40, 125	N/A	N/A	-40, 60
Precisión de Humedad	3%	5%	6%	3%
Rango de Humedad (%)	0 - 100	0 - 100	20 - 90	0 - 100
Durabilidad	Alta	Alta	Baja	Alta
Consumo (mA)	0,5	5	20	1.4
Precio (€)	2,5	0,75	0,45	19

Tabla 1. Descripción de los sensores propuestos

En la Tabla 1 se puede observar cómo los sensores SHT30 y HM1500LF destacan por su precisión de $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ en temperatura, adecuados para aplicaciones donde la temperatura es importante controlarla en los procesos biológicos de los cultivos.

El SHT30 tiene un rango de temperatura superior, comparado con el HM1500LF, por el contrario, no se han encontrado datos del resto de sensores.

En cuanto a la precisión y rangos de humedad, tanto el SHT30, como el HM1500LF ofrecen una precisión de humedad de $\pm 3\%$, ideal para aplicaciones precisas de riego. En cambio, en las otras opciones la precisión es inferior por lo que esta falta de precisión podría hacer que se evite tanto el riego excesivo como el insuficiente.

En términos de durabilidad, todos menos el SZYTF son adecuados para nuestro uso, al no soportar la exposición directa a la lluvia ya que no está completamente impermeabilizado.

El bajo consumo del SHT30 es menor que el resto de los sensores, lo que reduce la necesidad de recarga de baterías.

Finalmente, a pesar de su precisión, el alto coste del HM1500LF es una desventaja comparada con el SHT30. El bajo precio del sensor SZYTF es un aliciente, pero su baja precisión y durabilidad lo descartan para aplicaciones críticas, ocurre lo mismo con el sensor capacitivo Moisture v2.0.

3.3 Pruebas

Una vez analizadas las especificaciones técnicas, el siguiente paso consiste en validar la eficacia y adaptabilidad de los sensores en condiciones reales. Para ello, se realizarán dos pruebas diseñadas para evaluar el rendimiento de los sensores.

3.3.1 Entorno de pruebas

Para evaluar adecuadamente el rendimiento de los sensores seleccionados y determinar su idoneidad para aplicaciones agrícolas, se diseñaron y llevaron a cabo pruebas en dos entornos diferentes: uno controlado y otro al aire libre. Estos entornos fueron elegidos para simular tanto las condiciones óptimas como las variables a las que los sensores podrían estar expuestos durante su uso real en el campo.

La primera evaluación realizada consistió en una prueba llevada a cabo en un ambiente controlado. Para ello, se colocaron cuatro sensores dentro de una misma maceta llena de tierra, cogiendo las mediciones iniciales para que reflejaran un 0% de humedad real. Tras regar la maceta hasta alcanzar una saturación completa, los sensores registraron valores del 100% de humedad. El experimento continuó con la monitorización de la disminución gradual de la humedad conforme el agua se evaporaba, permitiendo así observar la variación en el porcentaje de humedad a lo largo del tiempo.

La segunda evaluación se llevó a cabo en un entorno al aire libre, expuestos a la ventilación natural y a la luz solar directa. Esta configuración buscó simular condiciones reales lo más fielmente posible, incorporando la influencia de factores no controlados típicos de entornos agrícolas.

Las pruebas han sido realizadas con un microcontrolador ELEGO UNO R3 [11], seleccionado por su flexibilidad y simplicidad en el manejo de múltiples conexiones. Para realizar todas las pruebas con un único microcontrolador, se descartó el uso de otros microcontroladores, como el ESP32, debido a la necesidad de múltiples entradas analógicas y GPIOs que estos no proporcionan. El software ha sido desarrollado con Arduino IDE [12] y para la comunicación de los datos se ha utilizado un módulo Bluetooth con el que se envían los datos a un dispositivo móvil en el que se recogían. En la medición se ha utilizado una maceta opaca (Figura 5) circular con 5 kilos de tierra.



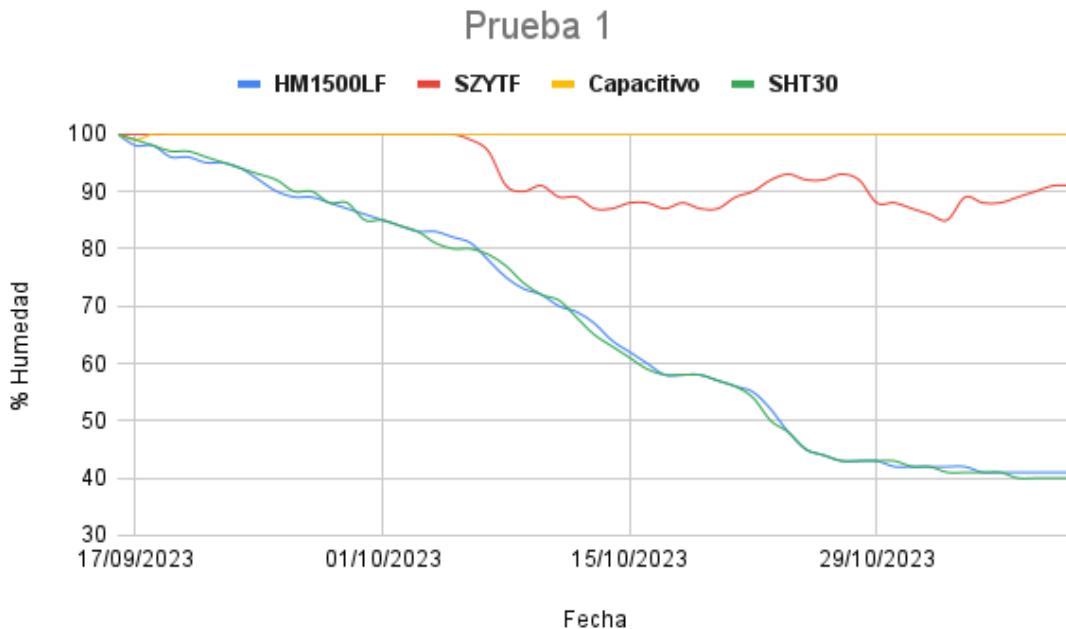
Figura 5. Maceta de pruebas

3.3.2 Resultados

En esta parte se presentan los resultados obtenidos de las pruebas a la hora de validar los sensores.

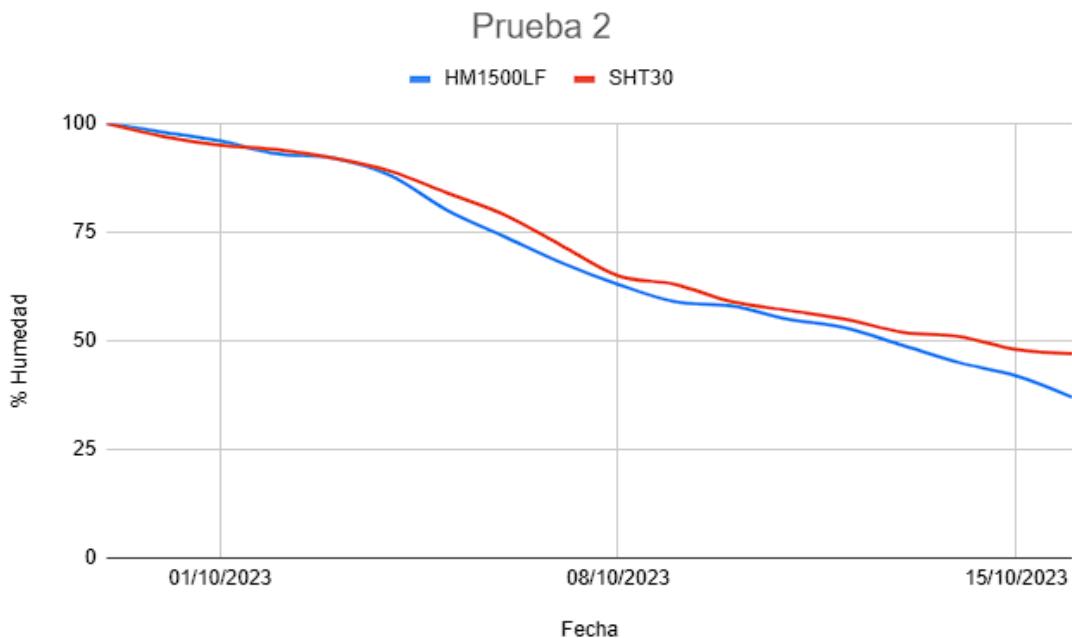
Primera prueba:

Esta prueba consistió en evaluar la respuesta de los sensores en condiciones controladas para verificar su precisión y estabilidad. Los resultados, ilustrados en la Figura 6, mostraron que tanto el sensor capacitivo como el SZYTF no cumplían con los requisitos esperados presentando anomalías como el aumento de la humedad en un entorno controlado, lo que llevó a su descarte para futuras pruebas. En cambio, se puede observar cómo el comportamiento de los sensores HM1500LF y SHT30 ha sido muy similar y son aquellos sensores que seguirán en este proceso de selección.

*Figura 6. Datos recogidos durante la prueba 1*

Segunda prueba:

En esta prueba, se comparó directamente la fiabilidad y la consistencia de los datos entre los dos sensores finalistas bajo condiciones ambientales no controladas, típicas de un entorno agrícola. El objetivo es determinar cuál de los dos sensores mantiene un rendimiento óptimo en situaciones reales, asegurando así su idoneidad para la monitorización de la humedad del suelo en condiciones variadas y desafiantes.

*Figura 7. Datos obtenidos en la prueba 2*

Los resultados expuestos en la Figura 7 correspondientes a la segunda prueba no revelaron diferencias significativas en el rendimiento de los sensores, lo que confirmó la idoneidad de ambos para aplicaciones agrícolas, en términos de precisión.

Finalmente, se ha elegido el sensor SHT30 para su uso en el proyecto. Aunque el sensor HM1500LF mostró un rendimiento similar, el coste del SHT30, siendo sustancialmente más bajo (aproximadamente 8 veces más barato), fue el factor decisivo para su selección. Esta elección se justifica por su adecuación técnica, su viabilidad económica, y por la facilitación de la implementación a gran escala en aplicaciones agrícolas sin imponer una carga financiera excesiva.

4. Hardware IoT

En la presente sección, se exponen los componentes hardware seleccionados para nuestro sistema. A continuación, se justifican las razones detrás de la elección de cada componente.

4.1 Heltec WiFi LoRa 32 v3

El Heltec WiFi LoRa v3 [13] es un módulo de comunicaciones que incorpora un microcontrolador ESP32, que ofrece soporte para WiFi y Bluetooth, y un transceptor LoRa, que permite el uso de esta tecnología. Esta combinación lo hace ideal para aplicaciones IoT donde la eficiencia energética y la capacidad de operar en redes de área extensa son necesarias. Además, incluye una pantalla OLED integrada, lo que facilita la visualización de datos y el diagnóstico en tiempo real sin necesidad de componentes externos. Esto, puede ayudar a conocer el estado del campo en tiempo real a los agricultores.

En la Figura 8 se puede observar el Heltec WiFi LoRa v3, dispositivo que además de sus características técnicas avanzadas aporta confianza debido a su soporte continuo. Al estar ya en su tercera versión, el dispositivo ha pasado por múltiples iteraciones de mejora, lo que asegura que los problemas conocidos han sido solucionados y que la plataforma está actualizada. Esto reduce el riesgo tecnológico y aumenta la estabilidad del sistema, haciendo del Heltec WiFi LoRa v3 una elección sólida para cualquier aplicación seria de IoT que busque rendimiento y fiabilidad a largo plazo.

El dispositivo cuenta con múltiples interfaces de entrada/salida (I/O), necesarias para la conexión de sensores y otros dispositivos externos. Entre estas, se pueden destacar los puertos de entrada/salida de propósito general (GPIO), permite la conexión directa de dispositivos externos para diversas funciones como la lectura de sensores digitales y el control de sensores. También destacar, el circuito inter-integrado (I2C), esta interfaz serial permite la comunicación con múltiples dispositivos utilizando dos líneas (SDA para datos y SCL para el reloj), el protocolo es especialmente útil para conseguir una comunicación bidireccional.

Precisamente, esta última interfaz es la utilizada por el protocolo de comunicación del sensor SHT30. Para que el sensor funcione, es necesario conectarlo al pin VCC de 3,3V y al GND correspondiente, consiguiendo así la energía y la toma a tierra. Para la comunicación, se utiliza el sistema de datos (SDA) y el sistema del reloj (SCL) teniendo que hacer la conexión en los pines 41 y 42 respectivamente.

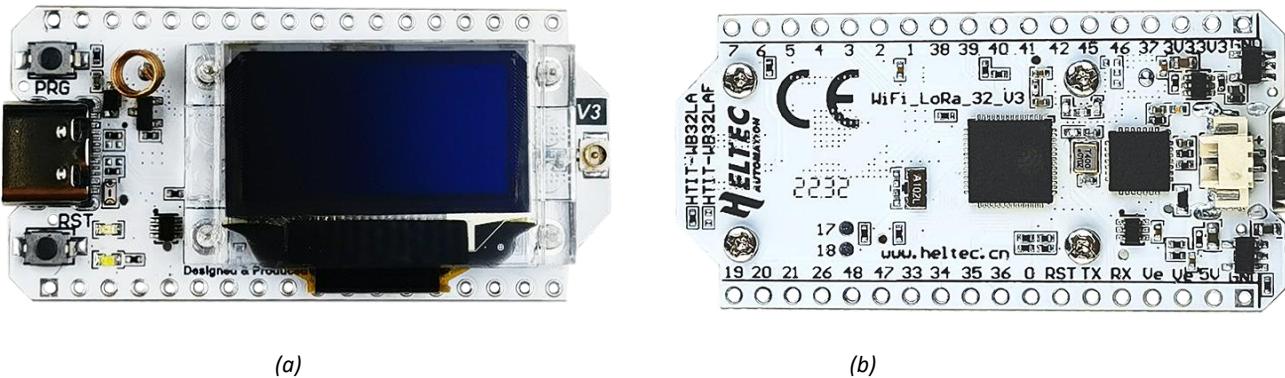


Figura 8. Microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3: (a) Frontal (b) Posterior

Las especificaciones técnicas del módulo, presentadas en la Tabla 2, se destacan por:

- Utiliza el ESP32-S3FN8, un procesador de doble núcleo Xtensa® 32-bit Ix7 que proporciona un alto rendimiento para manejar complejas operaciones de computación en aplicaciones IoT.
 - Equipado con el SX1262, chip de LoRa que optimiza la transmisión y recepción de datos, permitiendo una comunicación efectiva y de bajo consumo en frecuencias que varían entre 470-510 MHz y 863-928 MHz.
 - El módulo puede transmitir datos con un máximo poder de salida de 21 ± 1 dBm. Esto asegura una transmisión robusta y efectiva a largas distancias, necesario en áreas extensas.
 - La sensibilidad de recepción del módulo es de 125KHz, una alta sensibilidad de recepción que permite al módulo captar señales débiles y garantizar una comunicación fiable en redes de área extensa (WAN).
 - El dispositivo soporta WiFi 802.11 b/g/n, con velocidades de hasta 150 Mbps, y Bluetooth 5 (LE).
 - Interfaz USB tipo C con regulador de voltaje completo, protección ESD, protección contra cortocircuitos, blindaje RF y otras medidas de protección.
 - Interfaz de batería SH1.25-2 integrada, sistema de gestión de batería de litio integrado (gestión de carga y descarga, protección contra sobrecarga, detección de energía de la batería, conmutación automática de energía USB/batería). Consumo < 10uA en modo suspensión.
 - El módulo opera en un rango de temperatura de -20 a 70 °C, lo que permite su uso en entornos agrícolas, incluyendo condiciones climáticas adversas.
 - La pantalla OLED de matriz de puntos integrada de 0,96 pulgadas y 128*64 se puede utilizar para mostrar información de depuración, energía de la batería, etc.
 - Admite el desarrollo en diferentes plataformas como Arduino, Micro Python [14], Plataforma.io [15], etc.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
Chip maestro	ESP32-S3FN8 (procesador de doble núcleo Xtensa®32-bit Ix7)
Chip de nodo LoRa	SX1262
USB a chip serie	CP2102
Frecuencia	470~510MHz, 863~928MHz
Máx. Poder TX	21±1dBm
Máx. Recepción de sensibilidad	-136dBm@SF12 BW=125KHz
Wifi	802.11 b/g/n, hasta 150 Mbps
Bluetooth	Bluetooth 5 (LE)
Recurso de hardware	7*CAD1 + 2*CAD2; 7*Toque; 3*UART; 2*I2C; 2*SPI; etc.
Memoria	ROM de 384 KB; RAM de 512 KB; SRAM RTC de 16 KB; Flash SiP de 8MB
Interfaz	USB tipo C; Interfaz de batería de litio 2*1,25; Hormiga LoRa (IPEX1.0); Pasador de cabecera 2*18*2,54
Batería	Fuente de alimentación y carga de batería de litio de 3,7 V.
Temperatura de funcionamiento	-20 ~ 70 °C
Dimensiones	50,2*25,5*10,2mm

Tabla 2. Especificaciones Técnicas del Heltec WiFi LoRa 32 v3

4.2 Gateway LoRa:

El RAK7289V2/RAK7289CV2 WisGate Edge Pro [16] es un Gateway de la marca RAKwireless que permite establecer un enlace eficaz para dispositivos IoT que utilizan la tecnología LoRa. El dispositivo de la Figura 9, diseñado para ofrecer una conectividad robusta y confiable, facilitando la comunicación de datos entre sensores, nodos y otros componentes IoT a través de redes de largo alcance.

A continuación, se explican las principales características del dispositivo.

- **Tecnología:** es compatible con el protocolo LoRaWAN, permitiendo la comunicación con una gran variedad de dispositivos LoRa. Admite múltiples canales de transmisión simultáneamente, asegurando una comunicación eficiente y fluida.
- **Conectividad de red:** tiene conectividad Ethernet y soporte para WiFi, lo que permite al dispositivo conectarse a la infraestructura de red existente.

- **Hardware:** está equipado con un procesador de cuatro núcleos ARM Cortex-A53, el Gateway ofrece suficiente potencia para gestionar múltiples conexiones y procesar datos en tiempo real. Cuenta con 2GB de RAM y 16GB de almacenamiento interno, ampliables mediante una tarjeta microSD.
- **Diseño para exteriores:** el dispositivo está alojado en una carcasa resistente a la intemperie, lo que lo hace ideal para su uso en entornos exteriores y en aplicaciones industriales. Puede operar en un rango de temperatura de -30°C a 55°C.
- **Uso en aplicaciones:** es ideal para aplicaciones que requieren una conectividad continua y segura para dispositivos IoT, como sistemas de agricultura inteligente, seguimiento de activos, ciudades inteligentes y aplicaciones industriales.

El RAK7289V2/RAK7289CV2 WisGate Edge Pro ha sido seleccionado por sus características, su compatibilidad con el ecosistema LoRa y su robustez, lo que lo convierte en una firme elección para aplicaciones IoT que requieren una conectividad confiable y un rendimiento constante a largo plazo.



Figura 9. Gateway RAK7289V2/RAK7289CV2 WisGate Edge Pro (a) Vista superior (b) Vista inferior

El hardware seleccionado constituye la base del sistema IoT diseñado para la agricultura inteligente, donde cada componente se ha elegido pensando en las necesidades del entorno agrícola.

5. Diseño 3D

En el desarrollo de soluciones tecnológicas para la agricultura, una de las mayores dificultades es la de conseguir la durabilidad y funcionamiento de los sensores en condiciones adversas. Ubicados en mitad del campo, estos dispositivos están frecuentemente expuestos a inclemencias meteorológicas, como la lluvia, que pueden comprometer su integridad y funcionalidad dado que el agua representa una amenaza seria para los componentes electrónicos. Para contrarrestar este riesgo y proteger adecuadamente el hardware, se ha optado por una caja protectora personalizada, producida con una impresora 3D, que ofrece una barrera efectiva contra el agua y otros elementos ambientales, asegurando así la longevidad y rendimiento óptimo de los sensores en el campo.

Esta sección detalla el proceso de diseño y las especificaciones técnicas de la caja protectora, destacando cómo la tecnología de impresión 3D facilita la implementación rápida y a medida de soluciones protectoras en aplicaciones agrícolas.

5.1 Hardware y software

En el proceso de desarrollo de este prototipo para los sensores agrícolas, ha sido necesario utilizar tecnologías de software y hardware para asegurar la precisión, funcionalidad y adaptabilidad del diseño. Esta subsección se enfocará en detallar las herramientas de software y los componentes hardware empleados. Primero, empezaremos con los elementos hardware utilizados.

- **Bambu Lab X1-Carbon [17]:** en la Figura 10 aparece la impresora 3D de alto rendimiento que destaca por su precisión y fiabilidad, características necesarias para la fabricación de componentes como la caja protectora para sensores agrícolas. Este modelo en particular es conocido por su construcción robusta y su capacidad para trabajar con una variedad de materiales, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren durabilidad y resistencia ante condiciones adversas. La impresora es capaz de imprimir capas extremadamente finas, esta cualidad permite hacer superficies suaves y detalles precisos. Entre sus tecnologías encontramos el Modelado por Deposición Fundida (FDM), tecnología que garantiza que una pieza va a ser duradera y resistente. Además, es capaz de auto calibrarse, garantizando la nivelación perfecta de la cama de impresión, lo que reduce considerablemente el error humano. Cuenta con una gran cantidad de sensores que permite detectar los errores de detección de fin de filamento, y puede reanudar una impresión ante un corte de energía. Por último, cabe destacar que es compatible con una amplia gama de filamentos como pueden ser PLA, ABS, PETG y materiales compuestos, de manera que permite utilizar diferentes materiales para poder conseguir nuestras necesidades.

Especificación	Detalle
Tecnología de Impresión	FDM (Modelado por Deposición Fundida)
Volumen de Construcción	250 mm x 250 mm x 250 mm
Resolución de Capa	0.05 mm a 0.4 mm
Velocidad de Impresión	Hasta 500 mm/s
Diámetro del Filamento	1.75 mm
Materiales Compatibles	PLA, ABS, PETG, TPU, y más
Conectividad	USB, Wi-Fi, Ethernet
Pantalla	Pantalla táctil a color de 7 pulgadas
Sensores	Sensor de nivelación automática, sensor de filamento
Extrusores	Doble extrusor con lifting independiente

Tabla 3. Especificaciones técnicas de Bambu Lab X1-Carbon



Figura 10. Impresora 3D Bambu Lab X1-Carbon

- **PLA:** el PLA, o ácido poli láctico, es un tipo de plástico biodegradable que se utiliza comúnmente en la impresión 3D, especialmente en impresoras que emplean la tecnología de modelado por deposición fundida. Este material es derivado de recursos renovables como el almidón de maíz, la caña de azúcar o la tapioca, lo que lo convierte en una opción más sostenible en comparación con otros plásticos derivados del petróleo. Es un material cuya temperatura de fusión es baja, ya que oscila entre los 180°C y 220°C, lo que hace que sea compatible con la mayoría de las impresoras y sin necesidad de calentar la cama. Otra de sus virtudes es que muestra poca contracción o deformación durante la impresión, lo que lo hace ideal para proyectos en los que se requiere una gran precisión. Algunas de los inconvenientes que tiene el material son la baja resistencia térmica, ya que comienza a ablandarse alrededor de los 60°C. Otra desventaja es su fragilidad, aunque es razonablemente fuerte y rígido, hay otros materiales como el ABS que soportan mejor los impactos. También, el PLA es sensible tanto a factores ambientales como a solventes y químicos.
- **ABS:** el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es un termoplástico popular en la impresión 3D, derivado del petróleo y catalogado como un material robusto y resistente a altas temperaturas, lo que lo hace ideal para aplicaciones que demandan durabilidad. Este material combina una alta resistencia al impacto con una flexibilidad moderada, permitiendo que las piezas soporten estrés mecánico y golpes sin romperse. Además, el ABS puede soportar temperaturas más elevadas que otros plásticos como el PLA, sin deformarse, lo que permite a este material estar expuesto a fuentes de calor. Sin embargo, requiere de condiciones específicas ambientales para poder ser utilizado, en su defecto, la adhesión de las capas es prácticamente imposible. Finalmente, comentar que el material produce emisiones durante la impresión, que pueden causar irritación ocular y de las vías respiratorias, por lo que es necesario tener un espacio habilitado para su uso.
- **PETG:** este material llamado PETG o tereftalato de polietileno glicol-modificado, es un material de impresión 3D valorado por su versatilidad y resistencia. Este termoplástico combina la facilidad de uso del PLA con la resistencia y durabilidad del ABS. Entre sus cualidades, el PETG es conocido por su resistencia a la temperatura y a los impactos, además de no tener tanta capacidad de absorción a la humedad, como si la tienen otros plásticos. Las propiedades expuestas hacen que sea un material a considerar en piezas que estarán expuestas al aire libre o en entornos húmedos.

A continuación, se describen los diversos programas utilizados tanto para el diseño y modelado en 3D de las piezas, como para el laminado y la configuración de las impresoras 3D:

- **Blender** [18]: es un programa de software libre y de código abierto para la creación de gráficos 3D. Proporciona una suite completa de herramientas para modelado, escultura, renderizado, animación, simulación, edición de vídeo y creación de juegos. Utilizando este programa ha sido posible la creación del prototipo 3D.
- **Meshmixer** [19]: es otro software de edición de mallas que ha permitido modificar y manipular los prototipos 3D. Complementando a Blender, su principal labor ha sido la edición de las mallas y reparación de archivos STL, permitiendo así poder

reparar errores geométricos, cerrar huecos y eliminar errores en las mallas de este prototipo.

- **Bambu Studio** [20]: es el software propietario diseñado para las impresoras 3D de BambuLab. El programa permite la configuración y gestión de la impresora, permitiendo añadir ajustes para los modelos, como el uso de soportes, relleno, temperatura, velocidad, etc. También, cuenta con opciones de reparación de nodos o la posibilidad de utilizar la tecnología de Sistema de Material Automática (AMS) de la impresora, que permite realizar una misma pieza en diferentes colores.

5.2 Requisitos técnicos

En este apartado, se detallan los requisitos técnicos fundamentales que definen y garantizan la funcionalidad y viabilidad de este prototipo en el entorno agrícola. Se abordarán los distintos requisitos técnicos para que resulte práctico, eficaz y de bajo coste.

Primero, se destaca la importancia de la compacidad del diseño. La reducción en tamaño es necesaria para mejorar la portabilidad y simplificar la instalación en el entorno agrícola, facilitando su uso y mantenimiento.

El segundo requisito es la estanqueidad del prototipo. Este aspecto es fundamental para asegurar el funcionamiento continuo y eficaz de los sensores y componentes electrónicos, protegiéndolos contra la humedad y otros elementos ambientales que podrían comprometer su integridad y desempeño.

Adicionalmente, surge la necesidad de incorporar una ventana transparente que permita visualizar datos del módulo Heltec V3 ESP32 LoRa. Para mantener la estanqueidad con la inclusión de esta ventana, se emplea un sellado meticuloso con pegamento especial en el metacrilato, garantizando una barrera efectiva contra la entrada de agua y humedad.

Por último, se discute la modularidad del diseño, un requisito que posibilita la fácil integración de diversos sensores agrícolas. Esta característica permite adaptar el sistema a distintas necesidades y aplicaciones, facilitando la personalización y escalabilidad del prototipo. Así, se logra abarcar un amplio abanico de funciones sensoriales, adecuándose a distintos tipos de cultivos y condiciones ambientales. Esta modularidad es necesaria para desarrollar un prototipo versátil y adaptable a las variadas demandas del sector agrícola.

5.3 Modelado 3D

En esta tercera subsección dedicada al modelado 3D, se aborda el proceso de desarrollo de diversos prototipos que incorporan los requisitos técnicos previamente definidos hasta llegar a la versión final.

Al comienzo se realizaron distintos bocetos iniciales, posteriormente se analizó cada uno de ellos con la intención de seleccionar el que mejor se adapte a las necesidades del entorno. Cada diseño propuesto ha sido elaborado con el objetivo

de cumplir con los requisitos técnicos especificados anteriormente, enfocándose en la modularidad y la hermeticidad como características esenciales.

- Boceto Inicial 1: el diseño de la pieza tanto en papel (a) como en 3D (b), visible en la Figura 11 utiliza un mecanismo de rosca para asegurar la hermeticidad y facilitar la modularidad del ensamblaje.

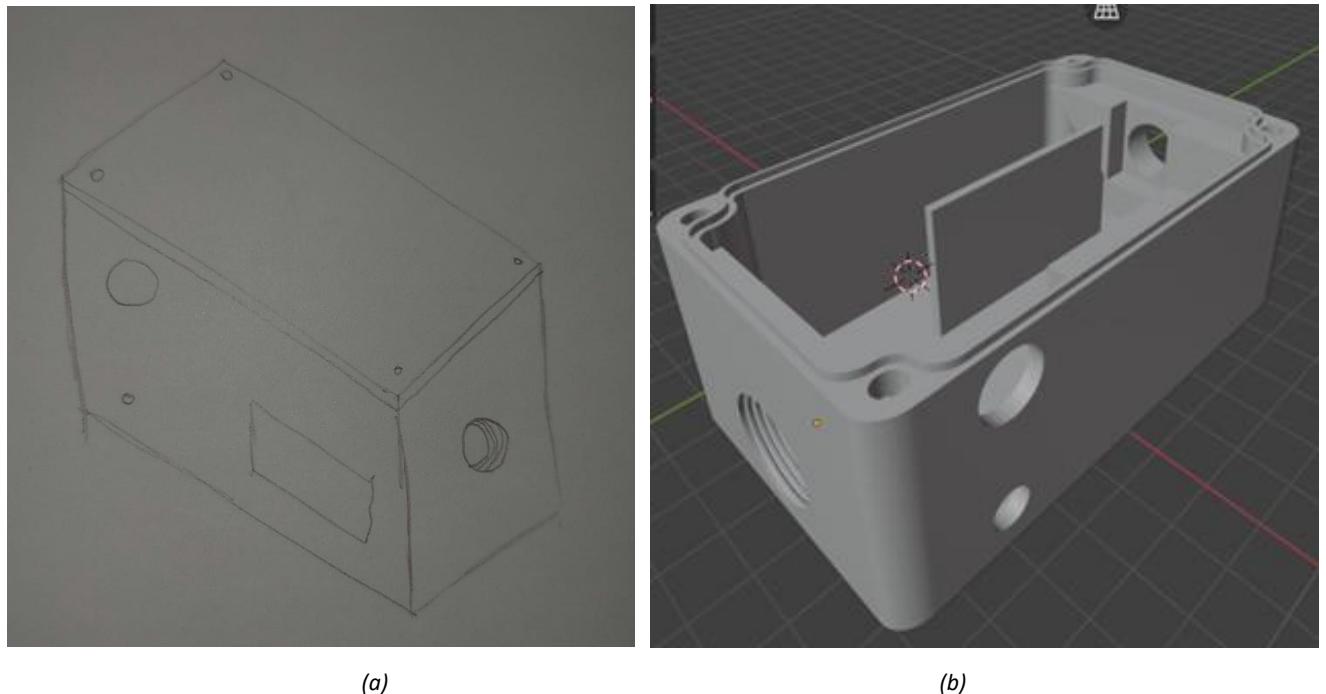


Figura 11. Boceto del prototipo 1 (a) en papel (b) en 3D

Boceto Inicial 2: propone una solución basada en tornillos y un cilindro pasador, similar al sistema utilizado en los hormigueros portátiles, para lograr la hermeticidad y modularidad requerida. Los modelos diseñados se pueden observar en la Figura 12.

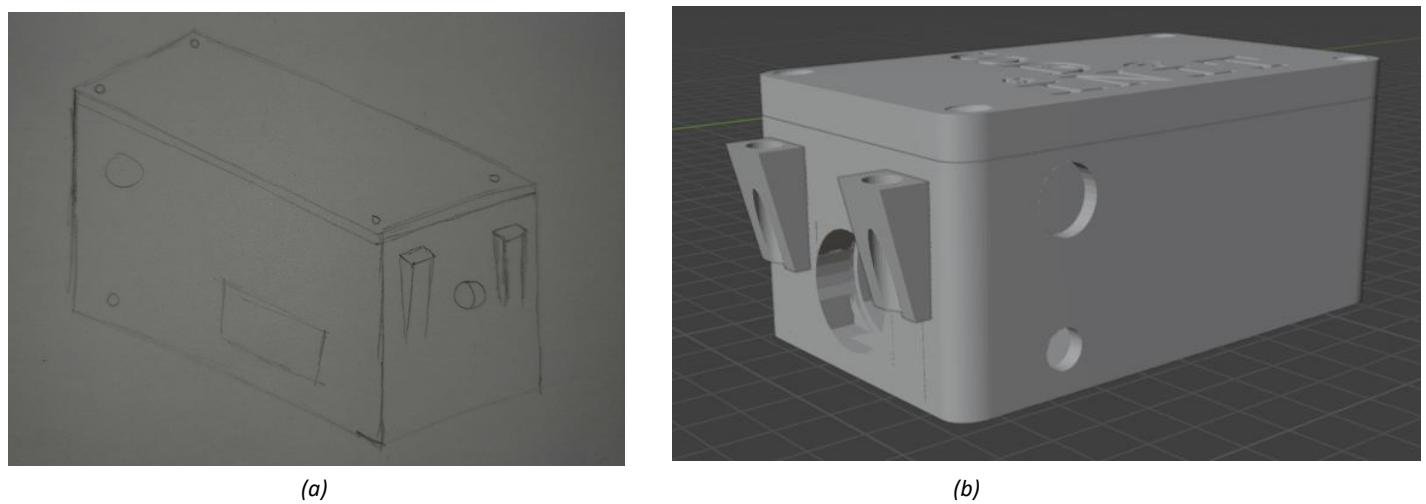
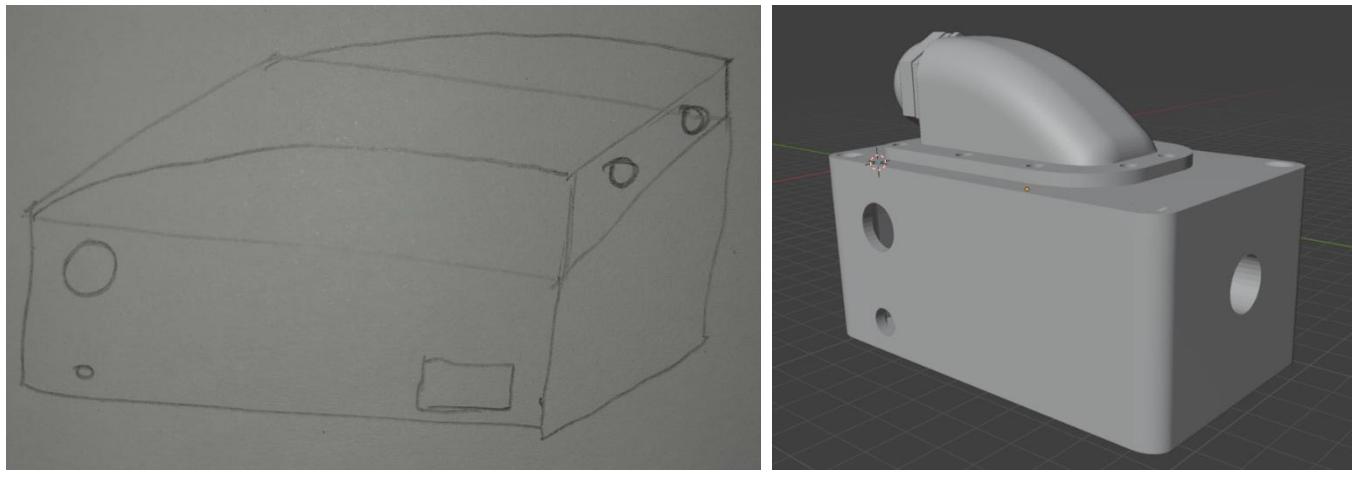


Figura 12. Boceto del prototipo 2 (a) en papel (b) en 3D

- Boceto Inicial 3: En el último diseño representado en la Figura 13, propone la utilización de prensaestopas para solventar los problemas de hermeticidad y modularidad.



(a)

(b)

Figura 13. Boceto del prototipo 3 (a) en papel (b) en 3D

Tras un análisis detallado de estos diseños, se seleccionó el Boceto Inicial 1 por su simplicidad, rapidez y coste económico, factores que superan las ventajas de los otros diseños más complejos y costosos. Los otros bocetos, aunque viables, requerían herramientas adicionales para la instalación y ajustes, lo que complicaba el proceso de montaje y aumentaba el tiempo de ensamblaje.

Tras la selección del boceto, el proyecto avanza hacia la fase de validación del diseño y las mejoras siguientes del prototipo.

5.4 Validación del diseño 3D

El objetivo de esta sección es convertir el boceto inicial seleccionado y sus especificaciones técnicas en un modelo digital completo. Este paso es necesario para asegurar que todas las partes del prototipo se ajusten correctamente y funcionen como se espera en un entorno agrícola.

Una vez seleccionado el diseño inicial, se realizó el modelado en 3D. Este proceso visible en el Anexo I involucra la revisión de las dimensiones, tolerancias y la integración de componentes para confirmar la viabilidad del ensamblaje.

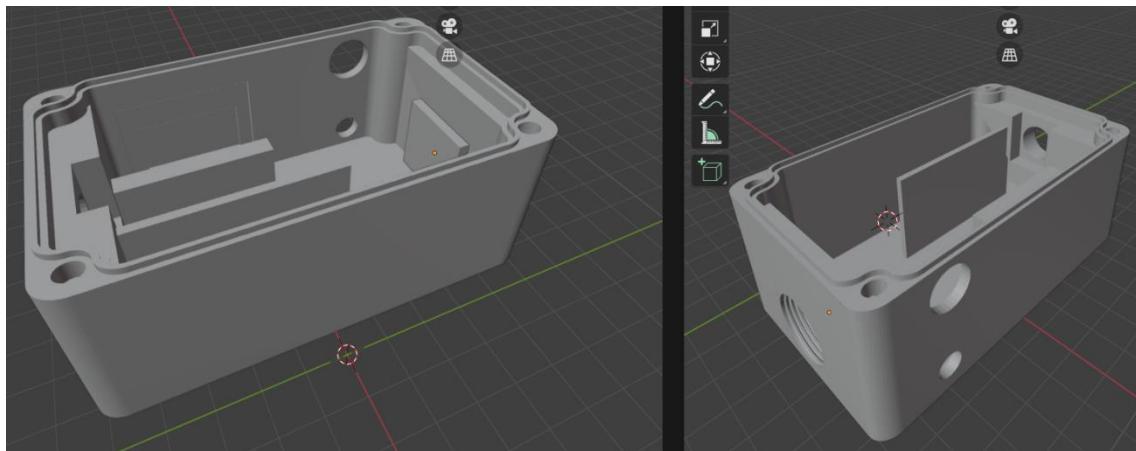


Figura 14. Diseño 3D del boceto

En la presente fase, se avanza hacia la iteración y optimización del modelo 3D del prototipo, el cual se puede observar en la Figura 14. El objetivo principal de esta etapa es refinar el diseño, mejorar la funcionalidad y aumentar la eficiencia del prototipo, asegurando que cada componente se ajuste perfectamente a las necesidades del proyecto.

Durante el proceso de iteración, se han realizado pruebas de resistencia para evaluar la durabilidad y la robustez del prototipo. Basándose en los resultados de estas pruebas se identificaron aquellas áreas donde se podía reducir el tamaño sin comprometer la integridad estructural o la funcionalidad del dispositivo.

Esta fase de iteración y optimización ha sido clave para asegurar que el prototipo final no es sólo funcional y robusto, sino también práctico y fácil de usar en las condiciones demandantes del entorno agrícola.

El material seleccionado para el prototipo es el PETG, adecuado para entornos agrícolas en los que tiene que tener una resistencia a la intemperie y a diversas sustancias químicas. También, combina propiedades de otros plásticos, como la resistencia y fuerza del ABS y la flexibilidad del PLA.

Para comprobar la robustez del prototipo, se utilizó una batería de pruebas similar a las que aparecen en la Figura 15, con la intención de evaluar el prototipo ante inclemencias meteorológicas.

La primera prueba realizada fue la de protección ante goteo vertical, evaluando la capacidad del prototipo para resistir el agua que cae verticalmente, reproduciendo condiciones de lluvia ligera. Posteriormente, se analizó la protección contra la pulverización de agua, observando cómo el prototipo disipa la exposición al agua en forma de pulverización, simulando una lluvia moderada.

A continuación, se evaluó la impermeabilidad del prototipo ante salpicaduras, probando su resistencia al agua desde diferentes ángulos. Después, se sometió al prototipo a flujos continuos de agua para verificar su capacidad de resistir condiciones de lluvia intensa. Finalmente, se examinó la protección del prototipo contra inmersiones temporales, asegurando su funcionamiento en caso de inundaciones parciales.

Estas pruebas se realizaron utilizando un grifo y una ducha, con los que se ha permitido aplicar diferentes modos de flujo, corroborando así diferentes presiones. Todas estas pruebas superadas son equivalentes a los requisitos especificados a la clasificación IP67, con lo que el prototipo sería resistente al polvo y al agua.

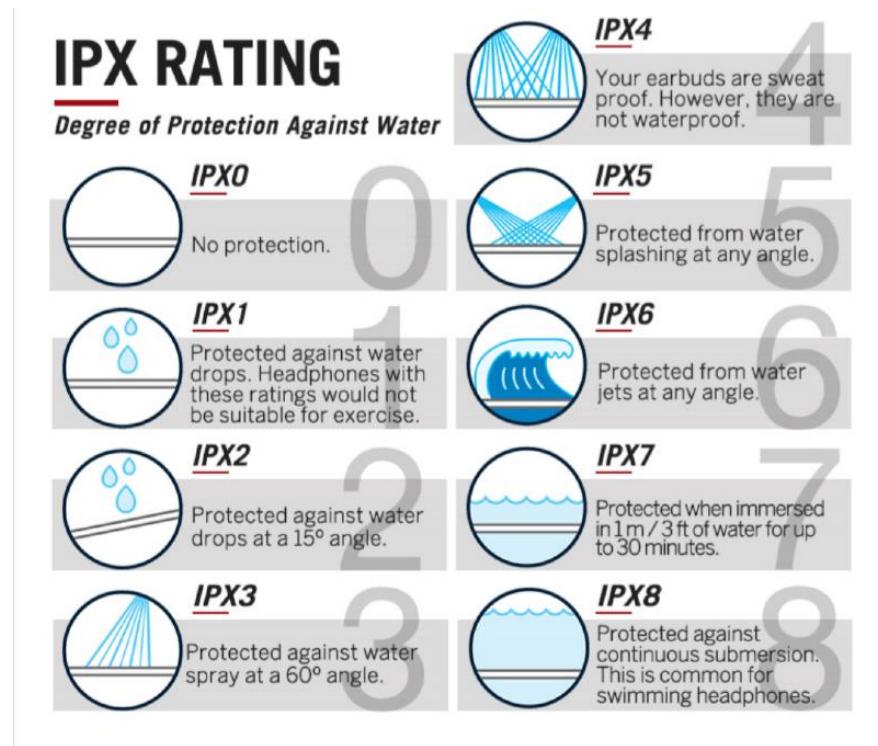


Figura 15. Clasificación de protección frente a agua. [39]

5.5 Prototipo final

En esta última sección se presenta el prototipo final, visible en la Figura 16 (a), desarrollado para la monitorización de la humedad del suelo en entornos agrícolas. Este prototipo ha sido diseñado y optimizado para garantizar su funcionalidad, durabilidad y resistencia ante condiciones ambientales adversas, fabricado mediante impresión 3D con tecnología FDM y en PETG.

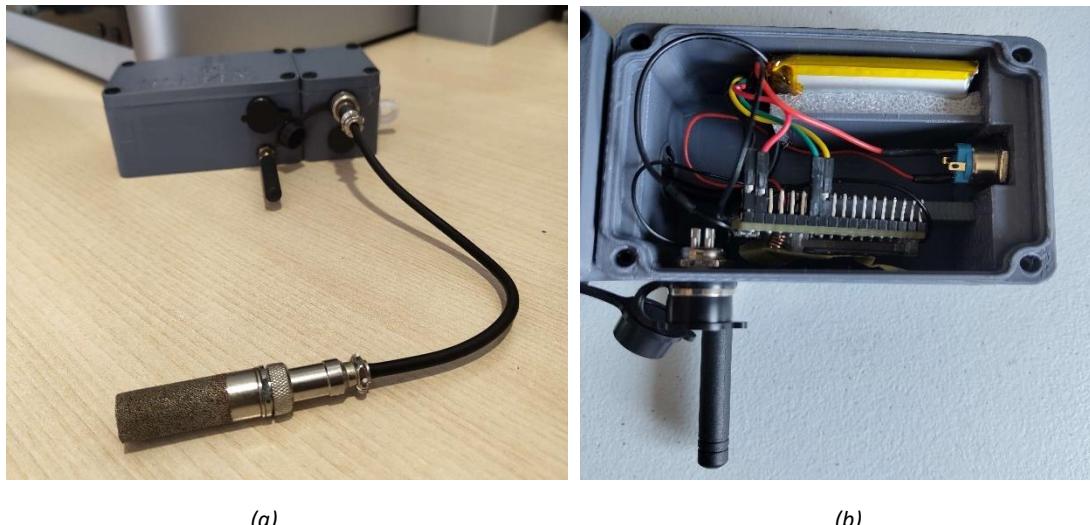
El prototipo se compone de dos módulos principales:

1. **Módulo principal:** este incluye todos los elementos hardware (Figura 16 b) necesarios para que actúe de endpoint. Equipado con un botón de encendido y un puerto de carga para la batería, facilitando su uso y mantenimiento.
2. **Módulo de sensores:** permite conectar dos sensores al módulo principal, la conexión al módulo se realiza mediante un mecanismo de rosca, en cambio, para la conexión de los sensores se utilizan conectores de aviación de cuatro pines. Este diseño asegura una conexión y desconexión rápida y segura de los sensores.

La tapa superior del prototipo lleva grabadas las letras del grupo de investigación, proporcionando una identificación clara y un toque de personalización.

A continuación, se exponen las características del prototipo:

- Hermeticidad: La caja protectora cumple con los estándares de clasificación IP67, asegurando resistencia al polvo y al agua, incluso en condiciones de inmersión temporal.
- Modularidad: El diseño modular permite la fácil integración y reemplazo de diversos sensores agrícolas, adaptándose a distintas necesidades y aplicaciones.
- Durabilidad: El uso de PETG y la estructura robusta garantizan una larga vida útil del prototipo, incluso bajo condiciones climáticas adversas.
- Facilidad de Uso: La disposición interna de los componentes y la accesibilidad a través de la tapa superior facilitan la instalación, mantenimiento y operación del prototipo.



(a)

(b)

Figura 16. Prototipo final (a) Exterior (b) Interior

El prototipo final ofrece una solución eficiente, adaptable, precisa y económica para la monitorización de la humedad del suelo en entornos agrícolas.

6. Comunicaciones

La utilización de tecnologías inalámbricas como LoRaWAN puede conllevar problemas como las interferencias, que a su vez puede causar dificultades para lograr una conexión estable y sólida entre los dispositivos y la red.

Uno de los principales problemas con la cobertura en las zonas rurales es la existencia de terrenos montañosos y obstáculos que puedan dificultar las comunicaciones [21].

Con motivo de facilitar y optimizar los despliegues en grandes extensiones se ha desarrollado una herramienta web que permite realizar un análisis de la cobertura entre dispositivos y gateways, pudiendo conocer con anterioridad si va a existir problemas de comunicación. De esta manera se pueden planificar los despliegues y minimizar el tiempo de necesario, así como sus costes.

6.1 LoRaWAN

LoRaWAN utiliza la tecnología de modulación LoRa, empleando como frecuencias los 868 Mhz en Europa, 433 Mhz en Asia y 915 Mhz en América. Sus características son ideales para aplicaciones donde los dispositivos necesitan enviar pequeñas cantidades de datos a lo largo de distancias extensas, permitiendo a los dispositivos comunicarse a varios kilómetros en entornos urbanos y más de diez kilómetros en espacios abiertos, con un consumo de energía muy reducido, lo cual hace que sea una tecnología a tener en cuenta para utilizar en entornos agrícolas.

Gracias a su bajo consumo energético, los dispositivos tienen una duración prolongada de la batería, además, utilizan técnicas de ahorro de energía, como el modo de espera (Dormancy) y la transmisión a baja potencia, lo que contribuye aún más a la eficiencia energética.

Sumado a esto, LoRaWAN es capaz de soportar una alta densidad de dispositivos conectados en una red, convirtiéndose en una solución escalable para implementaciones de IoT a gran escala.

También, resalta por su capacidad de penetración a través de obstáculos físicos, facilitando la comunicación de dispositivos ubicados en interiores o áreas con obstáculos con árboles u otros elementos.

Dadas las propiedades expuestas, LoRaWAN se convierte en una red adecuada para la agricultura de precisión, en virtud de que los dispositivos y sensores involucrados requieren conectividad a largas distancias y envían los datos de manera intermitente, es decir, no necesitan una comunicación continua.

La estructura de una red LoRaWAN se organiza mediante un esquema de estrella, donde cada dispositivo final se conecta de manera directa a una puerta de enlace, la cual hace la función de intermediario, facilitando el intercambio de mensajes entre los dispositivos terminales y el servidor de red.

La asignación de los nodos a gateways ocurre de manera no exclusiva, es decir, un nodo final no está vinculado a una única puerta de enlace, sino que se comunica con todas aquellas que están a su alcance, para aumentar la redundancia y la

fiabilidad de la transmisión de los datos. Además, facilita la escalabilidad del sistema, ya que únicamente se tienen que añadir más dispositivos, o gateways en caso de ser necesario.

La red ajusta los nodos de forma dinámica, basándose en factores como la calidad de la señal (RSSI) y la relación señal/ruido (SNR). El servidor de red automáticamente puede cambiar los nodos a una puerta de enlace diferente si las condiciones lo requieren.

Para gestionar eficazmente la red LoRaWAN, se utiliza ChirpStack [22], un servidor de red de código abierto que proporciona funciones de creación y gestión de redes LoRaWAN, y cuyo objetivo principal es el de proporcionar una plataforma de gestión que permita la comunicación eficiente y segura entre dispositivos conectados.

Una de las fortalezas de ChirpStack es su arquitectura multi-tenant, que posibilita que diversas organizaciones operen dentro de una misma instancia del servidor de manera independiente, lo que resulta imprescindible para llevar a la vez varios proyectos.

Además, ChirpStack incorpora capacidades de geolocalización que permiten ubicar dispositivos sin necesidad de GPS, empleando métodos como el tiempo de llegada y la diferencia de tiempo de llegada de las señales. En términos de configuración, la plataforma ofrece opciones detalladas para ajustar políticas de red, incluyendo tasas de datos, potencia de transmisión y frecuencia de emisión de datos, optimizando así tanto la cobertura de la red.

ChirpStack también soporta una amplia gama de protocolos de seguridad para asegurar la comunicación entre dispositivos, incluyendo versiones avanzadas de LoRaWAN, que mejoran tanto la autenticación como el cifrado. Todo esto se gestiona desde una consola de administración intuitiva que simplifica la configuración y el mantenimiento de dispositivos, gateways y aplicaciones, facilitando la implementación de flujos de datos automatizados y políticas de seguridad robustas.

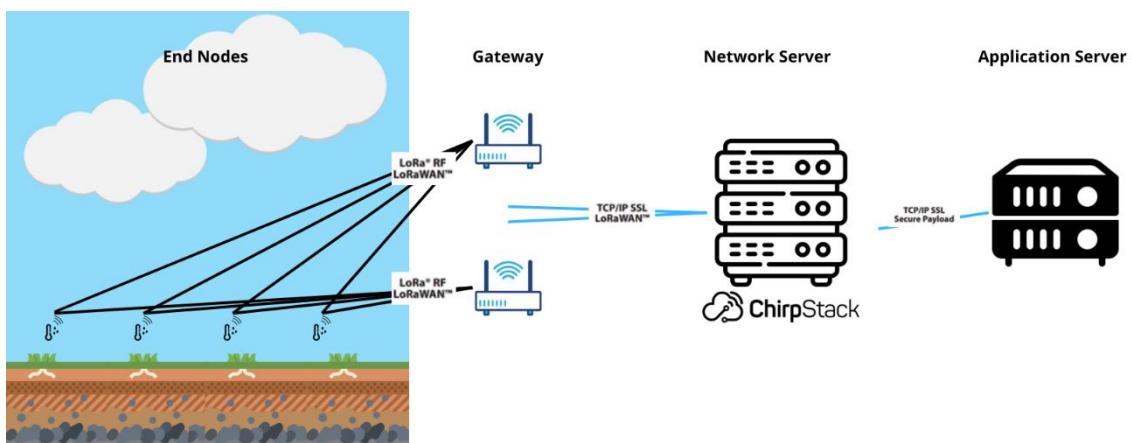


Figura 17. Arquitectura LoRaWAN

Tal como se muestra en la Figura 17, los componentes que constituyen esta arquitectura son:

- **Nodos finales:** estos dispositivos contienen sensores que recopilan información del entorno. En el contexto agrícola, el sensor que se seleccione será el encargado

de medir la humedad del suelo y la temperatura. Además, durante el desarrollo de este TFG se ha decidido que los nodos finales sean inalámbricos y autónomos, ya que cuentan con una batería, aunque también podrían estar conectados a placas solares que les permitiera trabajar de forma ininterrumpida.

La rutina de estos dispositivos se inicia con la adquisición del parámetro que está encargado de monitorizar, posteriormente realiza un mínimo procesamiento inicial de los datos. Acto seguido, codifica la información en un formato para que pueda transmitirse de forma eficiente. Después, la información se modula en una señal de radio resistente a las interferencias y apta para largas distancias. Finalmente, el nodo envía la señal modulada a las puertas de enlace a través de la frecuencia correspondiente para Europa 868 Mhz.

- **Gateways:** las puertas de enlace o Gateways se encargan de recibir las señales de radio de los nodos finales, para posteriormente enviar esta información al servidor de red utilizando conexiones estándar de Internet, como TCP/IP. La información generalmente va protegida por un protocolo de cifrado como SSL/TLS para aportar seguridad en la comunicación.
- **Servidor de red:** el servidor de red se encarga de realizar funciones de administración y del funcionamiento eficiente de la red.

Entre las operaciones de gestión de tráfico de los datos, el servidor trabaja en la deduplicación de mensajes, es decir, procesa las transmisiones recibidas de los diferentes Gateways y elimina la duplicidad de estos. Gracias a esta función, un mensaje emitido por un nodo final solo es almacenado una vez y evita la redundancia de información. También, trabaja en el enrutamiento de los datos, enviando la información a los servidores de aplicación.

El servidor cuenta con controles de acceso, de manera que autoriza que dispositivos pueden enviar y recibir datos. Además, cuenta con autenticación de dispositivos cuando los nodos finales se unen a la red, asignándoles un identificador único y claves de seguridad.

Otra de las tareas, es la gestión de calidad de servicio, donde el servidor adapta la tasa de datos o data rate (en inglés) para optimizar tanto el alcance como la duración de la batería de los nodos finales.

Aparte, destaca su labor en el mantenimiento de la red mediante la monitorización de la salud y rendimiento de esta. También, tiene en cuenta la actividad de los Gateway y la calidad de las conexiones.

Otro aspecto a destacar es el manejo del cifrado y descifrado de los mensajes utilizando AES-128, verificando su integridad, y garantizando la seguridad de los mismos entre nodos finales y servidores.

- **Servidor de aplicación:** Los servidores de aplicación tienen la misión de interpretar los datos y hacerlos útiles para el usuario final. Gracias a estos se facilita la interacción con los datos, proporcionando la capacidad de tomar decisiones inteligentes, automatizar acciones basadas en los datos recibidos, etc. Un ejemplo de este tipo de servidores es “The Things Industries” [23].

6.2 Fresnel

La tecnología LoRaWAN es ideal para la implementación de sistemas IoT en la agricultura de precisión. Sin embargo, para optimizar la calidad y fiabilidad de estas comunicaciones, es necesario considerar la zona de Fresnel en la planificación y despliegue de la red.

La zona de Fresnel (ver Figura 18) son una serie de elipsoides concéntricos que se extienden entre un emisor y un receptor. Esta zona es vital para entender cómo los obstáculos afectan a la calidad de la señal de radiofrecuencia que viaja entre dos puntos. En las comunicaciones inalámbricas, asegurarse de que la zona de Fresnel esté mayormente libre de obstáculos es clave para mantener una señal fuerte y clara.

La zona de Fresnel se compone de varias regiones elípticas, cada una representada como F_n , donde n es el número de la zona. La primera zona de Fresnel es la más crítica; si está libre de obstrucciones físicas, la señal tiene mayor probabilidad de llegar con fuerza al receptor. Cada zona sucesiva tiene menos impacto en la claridad de la señal, pero idealmente, al menos el 60% de la primera zona debe estar despejada para asegurar una buena calidad de transmisión.

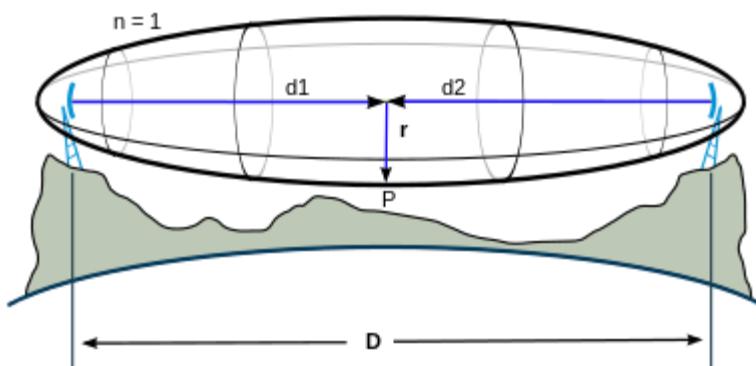


Figura 18. Cálculo de Fresnel [24]

En cuanto a la matemática, se calcula utilizando la longitud de onda de la señal transmitida y la distancia entre el transmisor y el receptor. La distancia radial r desde el eje central de la línea directa entre el emisor y el receptor hasta el borde de la n -ésima zona de Fresnel en un punto específico d a lo largo de la trayectoria se puede calcular con la Ecuación 1:

$$r = \sqrt{\frac{n\lambda d(D - d)}{D}}$$

Ecuación 1. Distancia radial de Fresnel

donde:

n es el número de la zona de Fresnel,

λ es la longitud de onda de la señal,

d es la distancia desde el transmisor al punto en cuestión,

D es la distancia total entre el transmisor y el receptor.

Gracias a esta fórmula se puede determinar el radio del elipsoide en cualquier punto entre el emisor y el receptor, asegurando que se pueda evaluar la línea de visión para obstrucciones potenciales.

6.3 FresSim

Para enfrentar los problemas comunes de la implementación de LoRaWAN, como son las interferencias y los problemas de conectividad, se ha desarrollado una herramienta web, denominada LoRa Fresnel Zone Simulator (FresSim) [25].

FresSim es una herramienta que ha sido diseñada para facilitar el análisis de la comunicación entre dispositivos y Gateways en redes LoRaWAN. Esta aplicación permite a los usuarios visualizar y evaluar el entorno, así como conocer cómo afecta a la comunicación de los dispositivos, incorporando factores críticos como la LoS y la zona de Fresnel, que son determinantes para una comunicación eficaz y confiable en sistemas inalámbricos.

Además de la zona de Fresnel, otros parámetros a tener en cuenta en la calidad de la comunicación son el alcance de la señal y la calidad de la conexión. Para llevar a cabo su evaluación, FresSim obtiene el perfil orográfico entre un dispositivo y el Gateway al que está asociado, mediante una API de elevación. Utilizando estos datos, FresSim genera un gráfico de elevación que representa el perfil del terreno y su interacción con la señal.

En la Figura 19, se presenta un esquema de la arquitectura del sistema, que representa el flujo de información y las interacciones entre sus componentes. La imagen muestra cómo los usuarios interactúan con la aplicación a través de una interfaz gráfica basada en React, que les permite importar datos en formato JSON, provenientes de plataformas de IoT como The Things Network (TTN) [26] o ChirpStack. Estos datos se traducen en visualizaciones de resultados que se muestran en la interfaz del usuario. Además, se detalla cómo la aplicación procesa las peticiones a través de la API de elevación, generando un conjunto de coordenadas que se utilizan para calcular el perfil orográfico. Finalmente, se encuentra la integración del sistema con una librería de mapas, que proporciona una representación geoespacial y visual de la comunicación entre el dispositivo y el Gateway, incluyendo la visualización de la línea de visión y la zona de Fresnel.

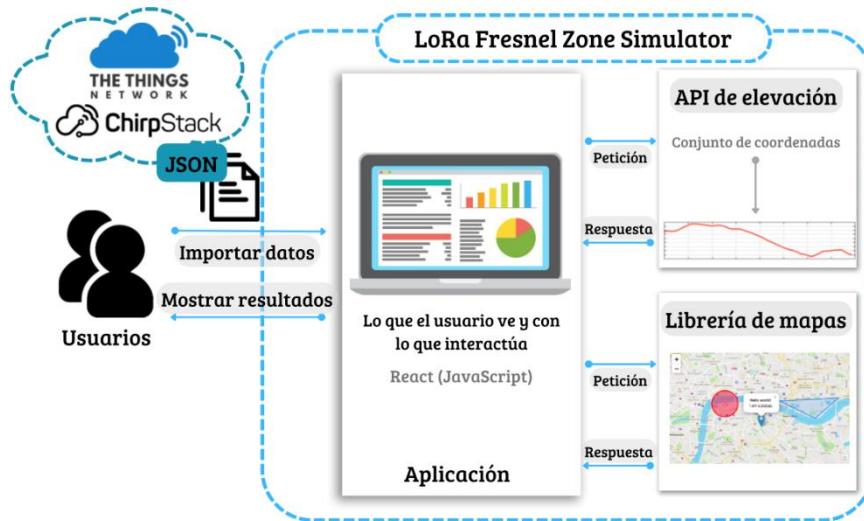


Figura 19. Arquitectura de FresSim

La arquitectura de FresSim permite la integración de distintos servicios y herramientas. En el núcleo de la aplicación, se establece una comunicación continua entre el cliente y el servidor, facilitando así la interacción dinámica con los datos. Para empezar, los usuarios deben introducir los datos de los despliegues en el sistema. Para ello, existen dos formas de inserción de datos, una automática y otra manual.

En el proceso automático, el usuario puede introducir en el sistema uno o varios ficheros JSON que contengan datos extraídos de TTN o ChirpStack. A partir de esos datos, referidos siempre a despliegues reales, el usuario podrá analizar las comunicaciones. Sin embargo, en la modalidad manual, el usuario deberá seleccionar dónde quiere añadir los dispositivos y Gateways. De esta forma, puede llevar a cabo la simulación de despliegues futuros.

Una vez están representados los dispositivos y Gateways en el mapa, se puede llevar a cabo el análisis de la comunicación entre los mismos junto con la orografía del terreno. Además, la herramienta determina el porcentaje de ocupación de la primera zona de Fresnel con el objetivo de estimar si va a existir comunicación en base a las obstrucciones físicas. El resultado de estos cálculos se presenta al usuario a través de una representación gráfica en la que se incluyen, tanto el perfil de elevación como la elipse de primera zona de Fresnel superpuesta.

Para garantizar una experiencia de usuario óptima, la arquitectura también está diseñada para ser escalable y capaz de soportar una gran cantidad de usuarios simultáneos sin que se vea afectado su rendimiento. La elección de tecnologías como React para el frontend, garantiza actualizaciones en tiempo real sin tener que recargar la página, mientras que la utilización de librerías de mapas interactivos asegura un manejo eficiente de los datos geoespaciales y una visualización clara y detallada. La arquitectura de FresSim proporciona un sistema funcional para llevar a cabo simulaciones y análisis de las comunicaciones LoRa, considerando los desafíos del entorno físico y las necesidades de los usuarios.

6.3.1 Tecnologías utilizadas

Para llevar a cabo el desarrollo de FresSim, se ha realizado una selección de tecnologías específicas, buscando aquéllas que ofrezcan una experiencia de usuario fluida y faciliten la visualización de datos geoespaciales. Además, estas tecnologías deben ser capaces de realizar cálculos con fluidez y con alta precisión. Esta selección de tecnologías se ve afectada por la necesidad de superar los desafíos que existen en el análisis de la cobertura de red en entornos complejos, donde factores como la orografía y la ocupación de la primera zona de Fresnel juegan roles críticos en la calidad de la señal de comunicación.

React [27] ha sido la tecnología central seleccionada para el desarrollo de FresSim debido a su flexibilidad en la creación de interfaces de usuario interactivas y su manejo eficiente de estados y componentes dinámicos. Su elección ha permitido una transformación significativa en la interfaz de usuario de FresSim, ofreciendo actualizaciones en tiempo real y una interacción sencilla con los datos geoespaciales representados en el mapa. Esta mejora en la experiencia del usuario permite actualizar y manejar de manera eficiente los componentes de la interfaz sin necesidad de recargar la página, facilitando así una interacción más fluida y dinámica.

Para la representación de mapas interactivos, se ha integrado Leaflet [28], una biblioteca de JavaScript reconocida por ofrecer funcionalidades para la creación de mapas interactivos. La combinación de React y Leaflet permite a FresSim mostrar detalladamente los dispositivos y Gateways en el mapa, mejorando la capacidad del usuario para interactuar con la herramienta y comprender los datos representados.

Por otro lado, la selección de una API de topografía para FresSim es un proceso que involucra la evaluación de varios criterios clave, incluyendo la cantidad de peticiones por segundo, las peticiones diarias que permite, la resolución de los datos de elevación, el número de puntos que pueden ser procesados en cada petición, o el coste de su uso.

Estos factores son fundamentales para asegurar que nuestra herramienta pueda realizar análisis topográficos detallados y precisos, esenciales para la planificación y optimización de redes LoRa.

API	Peticiones por segundo	Peticiones por día	Resolución	Puntos por petición	Coste por solicitud (USD)
Open-Meteo	-	10000	90 m	100	0
Open-Elevation	1	1000	30 m	100	0
Maps Elevation	10	2500	10 m	512	0.005
Bing Maps	5	50000	20 m	1024	0

Tabla 4. Comparativa de las propiedades de las diferentes APIs de elevación

A continuación, se va a llevar a cabo un breve análisis de cada una de las APIs analizadas. Estas son:

- Open-Elevation [29] ofrece servicios gratuitos y es ideal para el análisis general de elevaciones. Sin embargo, debido a que es muy utilizado, la API cuenta con problemas de rendimiento.
- Open-Meteo [30], disponible con licencia gratuita, ofrece una API de elevación que utiliza el modelo de elevación digital GLO-90, basada en el lanzamiento de Copernicus DEM 2021.
- Maps Elevation [31] es una API de Google que, aunque es una buena opción en términos de especificaciones, su uso implica un coste económico.
- Bing Maps [32] también es una API de elevación, en este caso ofrecida por Microsoft, con buenas prestaciones. Cuenta con diferentes planes de pago, aunque dispone de una versión gratuita limitada.

De cara a una correcta experiencia de usuario y una simulación precisa, es importante elegir una API que ofrezca un alto grado de precisión topográfica y la capacidad para gestionar un volumen significativo de datos.

Como se puede observar en la Tabla 4, Open-Meteo y Open-Elevation se presentan como soluciones accesibles, especialmente útiles para proyectos con requisitos menos exigentes en cuanto a resolución y volumen de procesamiento. Google Maps Elevation, por otro lado, equilibra la alta resolución con una capacidad de procesar más puntos en una única petición, representando una buena opción para análisis detallados, aunque conlleva costes asociados.

Finalmente, Bing Maps ofrece una combinación de alta resolución, ya que permite procesar múltiples puntos en una misma solicitud, y realizar numerosas peticiones de la API cada día. Además, ofrece una versión gratuita. Teniendo en cuenta todo lo anterior, además de los resultados que se presentan en la siguiente sección, se considera Bing Maps como la API más adecuada para su uso en FresSim.

La elección de Bing Maps como la mejor API para FresSim se justifica no solo por su superioridad técnica sino también por su capacidad para satisfacer las necesidades específicas de análisis topográfico del proyecto, permitiendo una planificación y optimización de redes más efectivas. Su gran resolución, combinada con la amplia capacidad de procesamiento de datos, la convierte en una herramienta indispensable para abordar los desafíos de planificación en entornos complejos, asegurando la fiabilidad y eficacia de las comunicaciones inalámbricas en áreas rurales.

Para finalizar la presente sección, es importante destacar que el uso de Chart.js [33] y Axios [34] ha permitido optimizar el rendimiento de FresSim. Por un lado, Chart.js se ha integrado para la creación de gráficos interactivos que visualizan la elevación del terreno, la zona de Fresnel, y otros datos relevantes, aportando claridad y profundidad al análisis. Axios, por su parte, facilita las peticiones a la API de elevación, agilizando las solicitudes HTTP y mejorando la interacción general con la herramienta.

Concluyendo, la implementación de LoRaWAN, apoyada por herramientas como FresSim, permite superar los retos de conectividad en entornos agrícolas. En las próximas secciones, se evalúa cómo estas tecnologías se aplican en contextos agrícolas para mejorar tanto la recolección de datos como la gestión de

los cultivos, y veremos el impacto directo de nuestra red de comunicaciones en operaciones reales.

6.3.2 Comparativa de la resolución de las APIs de elevación

Esta subsección analiza la resolución de las diferentes APIs de elevación, es decir, Open-Meteo, Open-Elevation y Bing Maps, excluyendo la API de Google por sus costes de uso. Para llevar a cabo la comparativa, se han seleccionado dos localizaciones determinadas (inicio y final), y se ha obtenido la altitud de cada uno de los puntos intermedios entre ambas localizaciones. Además, se ha considerado oportuno evaluar cada API utilizando tres conjuntos de puntos intermedios: 20, 50 y 100 puntos.

La Figura 20 muestra la comparativa de perfiles de elevación generados utilizando las tres APIs anteriormente mencionadas. Como se puede observar, los resultados varían significativamente; a pesar de que todas las APIs muestran una tendencia general similar en la variación de elevación, existen notables diferencias en la resolución de los datos y en la suavidad de las líneas del perfil, especialmente al comparar los conjuntos de datos con un menor número de puntos.

No obstante, a medida que aumenta el número de puntos, la API de Bing muestra una mayor precisión que el resto. En concreto, presenta una resolución 3 veces superior a Open-Elevation y 9 veces superior a Open-Meteo. En consecuencia, la API seleccionada cuenta con una mayor consistencia en sus resultados a través de los diferentes tamaños de conjuntos de datos, como se evidencia por la suavidad y el detalle de las líneas de perfil en comparación con las otras dos APIs. Por ejemplo, con 100 puntos intermedios, la línea del perfil de Bing (línea continua en azul) presenta menos variabilidad que las otras APIs, lo que sugiere una mayor resolución en los datos de elevación.

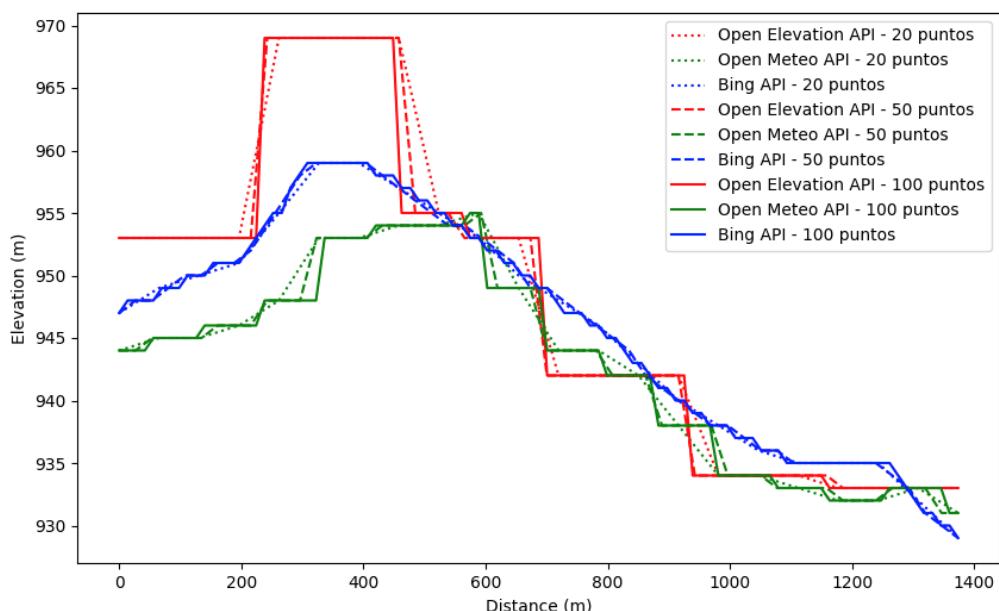


Figura 20. Resolución entre dos puntos

6.3.3 Pruebas de la herramienta

A continuación, se van a detallar las pruebas realizadas para evaluar la cobertura de la red, con el objetivo de analizar la eficiencia del sistema de comunicación inalámbrica implementado. Para las pruebas se ha seleccionado un fichero de comunicación importado desde ChirpStack en el que se han emitido mensajes en diferentes localizaciones, procedente de un despliegue real. Hay que tener en cuenta que, en el fichero importado sólo se obtienen las señales del dispositivo cuando ha existido comunicación entre el mismo y el gateway.

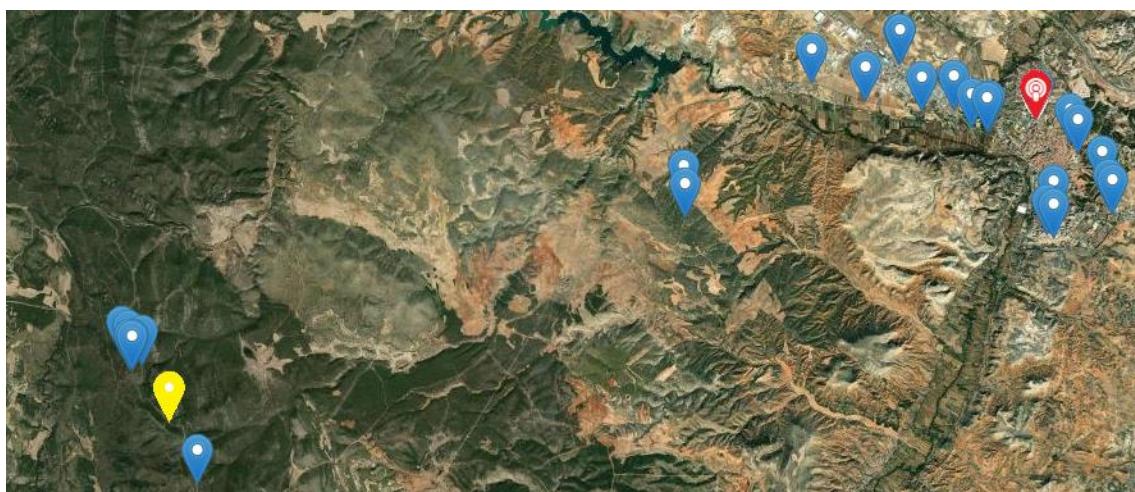


Figura 21. Pantalla de FresSim donde se representa el despliegue de la prueba

Como se puede ver en la Figura 21, FresSim representa con marcadores azules las localizaciones de los dispositivos donde ha existido comunicación, y con un marcador rojo el Gateway. Después de analizar la imagen se pueden observar zonas con conectividad, mientras que hay zonas en las que se aprecia la pérdida de señal derivado de la ausencia de puntos.

Para las pruebas, únicamente se han seleccionado dos localizaciones donde ha habido comunicación (en azul) y una generada a mano (en amarillo) en la que sabemos que no ha habido comunicación, es decir, que no ha sido emitido por el dispositivo por falta de comunicación, con el objetivo de analizar tres situaciones diferentes.

La Figura 22 muestra la orografía entre el dispositivo situado en la primera localización y el gateway. Tal y como se puede observar la ocupación de la zona de Fresnel es del 0%, existe LoS entre el dispositivo y el Gateway, y no hay obstáculos dentro de la primera zona de Fresnel. La falta de obstáculos hace que la señal se transmita de manera eficiente logrando una cobertura total.

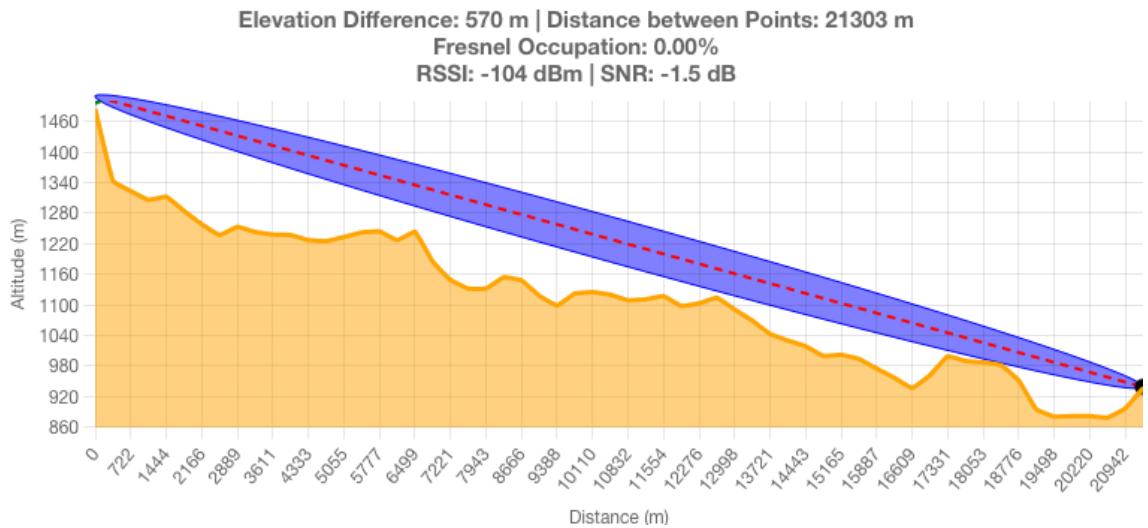


Figura 22. Perfil y zona Fresnel entre dispositivo y Gateway con 0% de ocupación

Por su parte, la Figura 23 muestra el perfil entre la segunda localización y el Gateway. A diferencia del anterior ejemplo, la herramienta obtiene un 6% de ocupación de la primera zona de Fresnel. No obstante, en este caso también se han recibido correctamente los paquetes, ya que el porcentaje de zona libre es lo suficientemente grande para que exista comunicación.

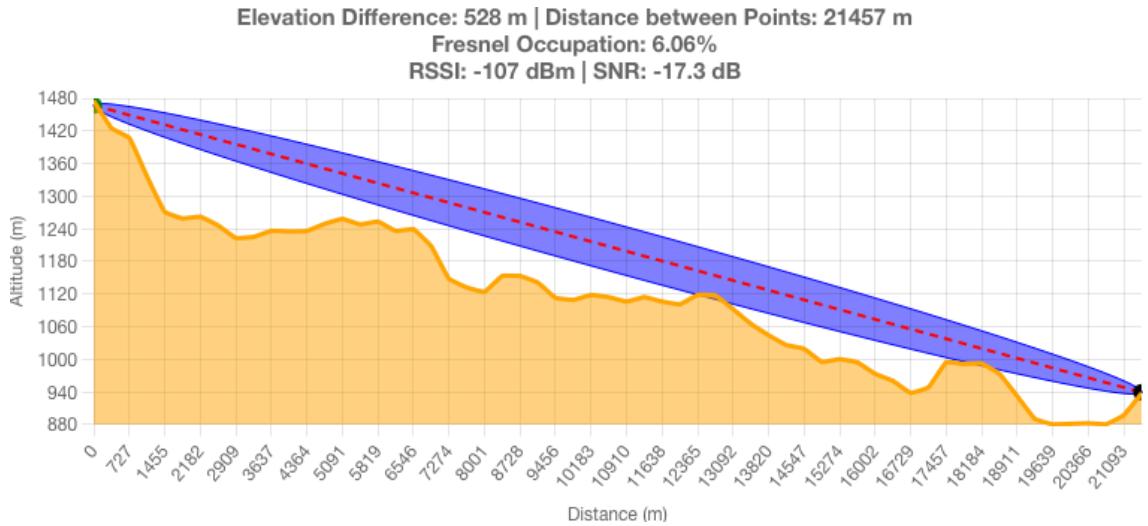


Figura 23. Perfil y zona Fresnel entre dispositivo y Gateway con 6% de ocupación

Finalmente, la Figura 24 muestra el perfil orográfico de la tercera de las localizaciones analizadas, es decir, la que aparece en amarillo en la Figura 21, y que se ha introducido de forma manual en FresSim. Concretamente, el Gateway no recibió ningún paquete enviado por el dispositivo en dicha localización.

Como se puede ver, el porcentaje de ocupación de la zona de Fresnel en este caso es de un 63,34%. Teniendo en cuenta esto, FresSim nos indica que no va a existir comunicación, como así ha sido en la realidad, a pesar de que existe LoS entre el dispositivo y el Gateway.

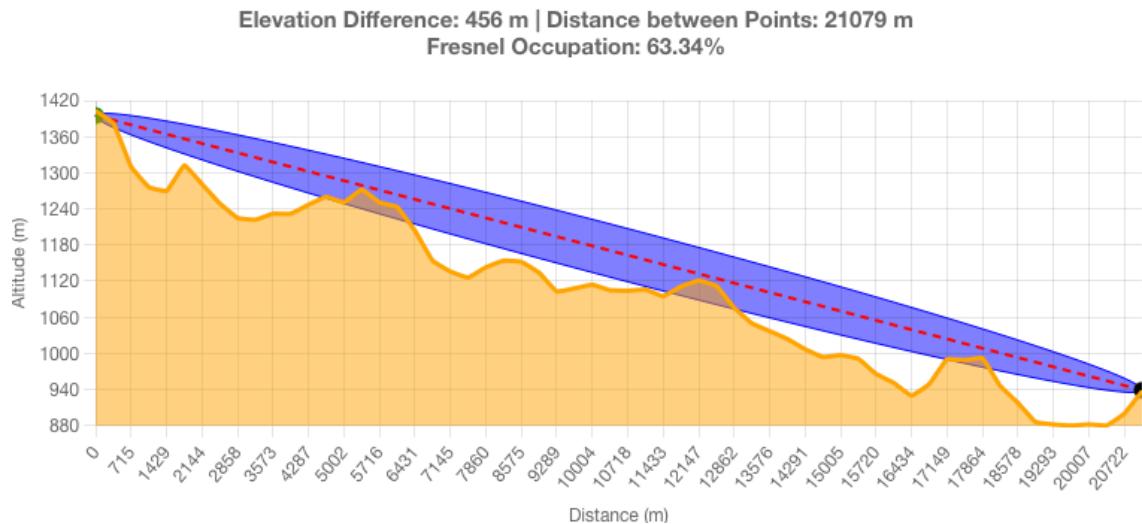


Figura 24. Perfil y zona Fresnel entre dispositivo y gateway con 63,34% de ocupación

Los resultados obtenidos evidencian la eficacia de FresSim como una herramienta de predicción en la planificación y análisis de la cobertura de redes LoRaWAN. A pesar de la ausencia de otras herramientas que provean un porcentaje de ocupación de la zona de Fresnel para validar cuantitativamente los resultados, las pruebas realizadas demuestran que FresSim proporciona estimaciones que coinciden con el despliegue real. Esta precisión se ve reflejada en la capacidad de la herramienta para predecir correctamente las áreas de comunicación efectiva, así como aquellas zonas donde se interrumpe la señal debido a obstrucciones orográficas.

7. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se propone un prototipo económico para la monitorización de la humedad del suelo. El diseño y desarrollo de este dispositivo pretende ayudar a optimizar los recursos y facilitar la toma de decisiones en el sector agrícola.

El primer objetivo, la medición de la humedad del suelo con dispositivos de bajo coste, se ha alcanzado mediante la selección de sensor que cumple con los requisitos de precisión, coste y durabilidad. El diseño del encapsulado del prototipo mediante impresión 3D asegura la protección de los componentes electrónicos ante condiciones ambientales adversas, garantizando así su durabilidad y operatividad a largo plazo.

Respecto a la optimización de los despliegues, ha sido abordada mediante el análisis de la eficacia y el alcance de la red LoRaWAN en entornos agrícolas. Se ha desarrollado una aplicación web para facilitar el despliegue del sistema. Esta herramienta ha permitido analizar la viabilidad de los despliegues y verificar la cobertura y el alcance entre los dispositivos y Gateway, teniendo en cuenta la orografía del terreno.

Durante el desarrollo del TFG, se ha presentado un artículo mostrando los resultados de la herramienta FresSim al congreso organizado por la Sociedad de Arquitectura y Tecnología de Computadores (SARTECO) [35], y se presentará entre el 17 y el 19 de junio en La Coruña.

En conclusión, la aplicación del prototipo en la Agricultura 4.0 ofrece numerosas ventajas, como la mejora en la gestión del riego, el uso de fertilizantes, la detección temprana de condiciones subóptimas y la capacidad de respuesta rápida ante eventos adversos. Este proyecto valida la aplicación de LoRaWAN en un contexto agrícola y sienta las bases para futuras investigaciones que podrían expandir su uso a otras áreas de la gestión agrícola y ambiental, promoviendo una agricultura más sostenible y eficiente.

8. Bibliografía

- [1] O. A. Osanaiye, T. Mannan y F. Aina, «An IoT-based soil moisture monitor», *Routledge*, 2022.
- [2] S. S. Bhattacherjee, S. Shreeshan, G. Priyanka, A. R. Jadhav y P. R. a. J. Kholova, «Cloud based Low-Power Long-Range IoT Network for Soil Moisture monitoring in Agriculture», *IEEE Sensors Applications Symposium*, 2020.
- [3] F. F. Hossain, R. Messenger, G. L. Captain, S. Ekin, J. D. Jacob, S. Taghvaeian y J. F. O'Hara, «Soil Moisture Monitoring Through UAS-Assisted Internet of Things LoRaWAN Wireless Underground Sensors», *IEEE Access*, 2022.
- [4] R. Oliveira, L. Guardalben y S. Sargento, «Long range communications in urban and rural environments, IEEE Computer Society», 2017.
- [5] S. Sendra, L. Garcia, J. Lloret, I. B. Vega-Rodriguez y Roberto, «LoRaWAN Network for Fire Monitoring in Rural Environments», *Electronics*, 2020.
- [6] «HeyWhatsThat», Available: <https://www.heywhatsthat.com/> .
- [7] R. Rubalcava, «ArcGIS web development», Simon and Schuster, 2014.
- [8] S. Ltd., «Surface Elevation Tool», Available: <https://www.solwise.co.uk/wireless-elevationtool.html>.
- [9] SCADACore, «RF Line of Sight», 20 12 2023. Available: <https://www.scadacore.com/tools/rf-path/rf-line-of-sight/>.
- [10] R. Coudé, «Radio Mobile-RF propagation simulation software», *Radio Mobile*, 1998.
- [11] E. Official, «Uno r3 Board with USB Cable», Available: <https://www.elegoo.com/collections/arduino-kits/products/elegoo-uno-r3-board> .
- [12] Team, T. A.Software, «Arduino», Available: <https://www.arduino.cc/en/software>.
- [13] Heltec Automation, «WIFI Lora 32(v3)», Available: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>.
- [14] MicroPython, «Python for microcontrollers» , Available: <https://micropython.org/>.
- [15] PlatformIO, «Your gateway to embedded software development excellence», Available: <https://platformio.org/platformio-ide>.
- [16] RAK Documentation Center, «RAK7289V2/RAK7289CV2 WisGate Edge Pro Datasheet», Available: <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7289-V2/Datasheet/>.

- [17] Bambu Lab EU, «Impresora 3D bambu lab X1 - Carbon Combo», Available: <https://eu.store.bambulab.com/es-es/products/x1-carbon-combo>.
- [18] Blender, Available: <https://www.blender.org/>.
- [19] Meshmixer, «Meshmixer is state-of-the-art software for working with triangle meshes» , Available: <https://meshmixer.com/>.
- [20] Software studio - bambu lab, Available: <https://bambulab.com/en/download/studio>.
- [21] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, F. Serna, F. J. Martinez, P. Garrido y C. T. & Calafate, «Improving LoRaWAN Connectivity in Smart Agriculture Contexts Using Aerial IoT», 2023 *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 1027-1032., 2023.
- [22] ChirpStack, «ChirpStack, open-source lorawan® network server», Available: <https://www.chirpstack.io/>.
- [23] The LoRaWAN Network server for scale, «Where companies scale their LoRaWAN® Solutions», Available: <https://www.thethingsindustries.com/>.
- [24] Jcmcclurg, «Wikipedia», Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_Fresnel.
- [25] M. S. Bruno, «FresSim», Available: <http://initiot.unizar.es/fressim>.
- [26] The Things Network, «The things network», Available: <https://www.thethingsnetwork.org/>.
- [27] React, Available: <https://es.react.dev/>.
- [28] Leaflet, «An open-source JavaScript library for interactive maps», Available: <https://leafletjs.com/>.
- [29] J. R. Lozano-Pinilla, I. Sánchez-Cordero y C. Vicente-Chicote, «Smart-Routing Web App: A Road Traffic Eco-Routing Tool Proposal for Smart Cities», *Springer*, pp. 247-258, 2023.
- [30] E. S. A. a. Airbus, "Copernicus DEM", *Institution: European Space Agency*, 2022.
- [31] A. Bounceur, L. Clavier, P. Combeau, O. Marc, R. Vauzelle, A. Masserann, J. Soler, R. Euler, T. Alwajeeh, V. Devendra y others, «CupCarbon: A new platform for the design, simulation and 2D/3D visualization of radio propagation and interferences in IoT networks», *IEEE*, pp. 1-4, 2018.
- [32] A. Mitra, S. Karthikeyan, S. Chakkaravarthy, M. V. Cruz, G. P. Rajan y S. S. Ganesh, «A potable water location tagging system for victims of natural calamities», *Elsevier*, 2022.
- [33] Chart.js, «Open source HTML5 Charts for your website», Available: <https://www.chartjs.org/>.
- [34] Axios, «Cliente http basado en promesas para el navegador y node.js», Available: <https://axios-http.com/es/>.

- [35] Jornadas Sarteco, Available: <https://jornadassarteco.org/>.
- [36] Blender, «Bolt Factory#. Bolt Factory - Blender 4.1 Manual.», 23 4 2024. Available: https://docs.blender.org/manual/en/latest/addons/add_mesh/boltfactory.html.
- [37] Thingiverse.com, «Waterproof electronic box / enclosure by pbtec. Thingiverse», Available: <https://www.thingiverse.com/thing:4921568>.
- [38] Thingiverse.com, «Digital designs for physical objects. Thingiverse.» , Available: <https://www.thingiverse.com/>.
- [39] Hypergear, Available: <https://www.hypergear.com.my/blogs/news/a-guide-for-buying-a-dry-bag>.

Anexo I: Creación del módulo principal

El proceso de creación del módulo principal ha sido desarrollado en Blender [36]. Se ha partido de un diseño inicial [37] que no era propio, obtenido de Thingiverse [38], una plataforma donde los usuarios pueden subir sus propios diseños. Concretamente, el diseño inicial es la Figura 25, se trata de una caja estanca e impermeable con tapa, a la que posteriormente se le han aplicado un conjunto de transformaciones para adaptarla a las necesidades actuales del proyecto.

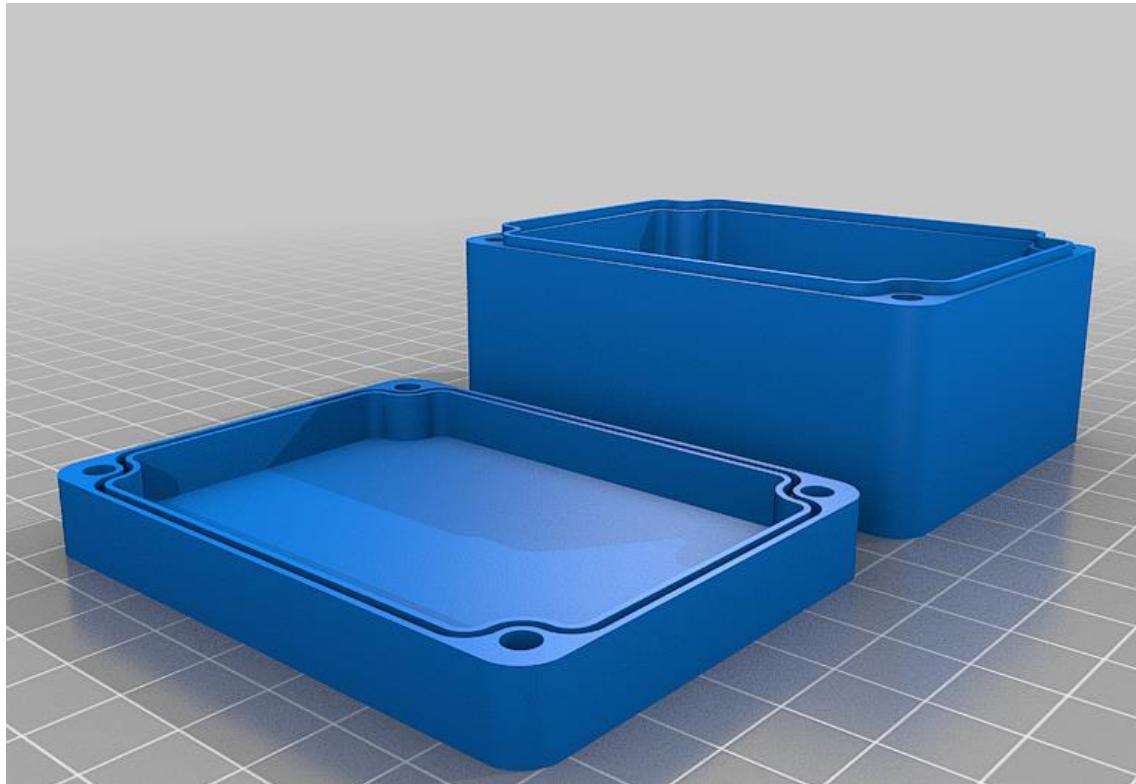


Figura 25. Prototipo inicial

El primer paso para la creación del módulo principal fue el reescalado de la caja a las medidas establecidas en los planos. Para el reescalado, se tiene que entrar en modo objeto, y posteriormente se selecciona la parte que queremos modificar. En este caso, se modifica el alto de la caja que aumenta a 39 mm (ver Figura 26) y el ancho de la pared inferior que disminuye a 2 mm (ver Figura 27), el largo de la caja se modifica hasta los 103 mm de largo (ver Figura 28), no modificando el ancho y dejándolo en 60 mm (ver Figura 29). Finalmente, la pared interior en la que se apoyará tanto la batería como el microcontrolador se aumenta 6 mm de forma que se genere una superficie plana.

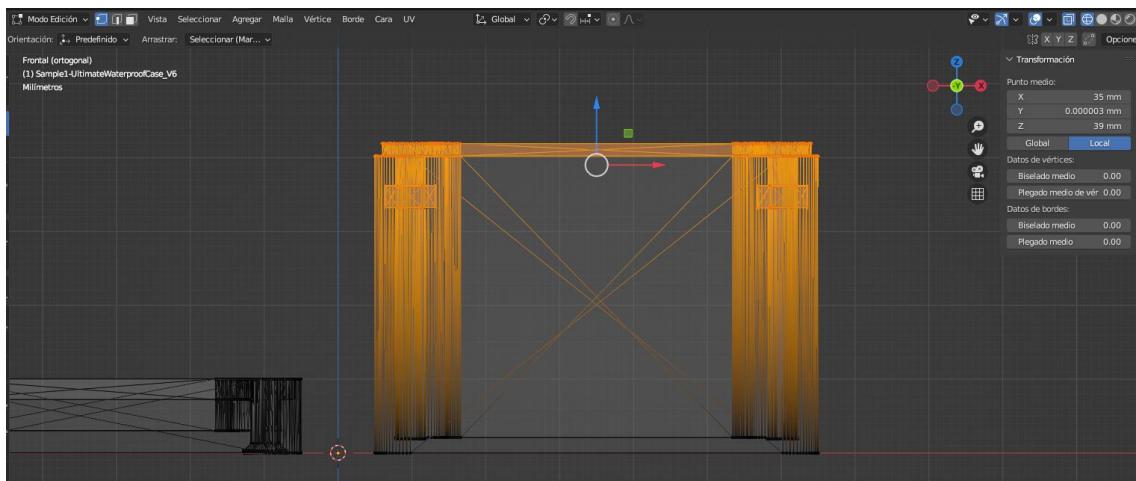


Figura 26. Modificación de la base en altura

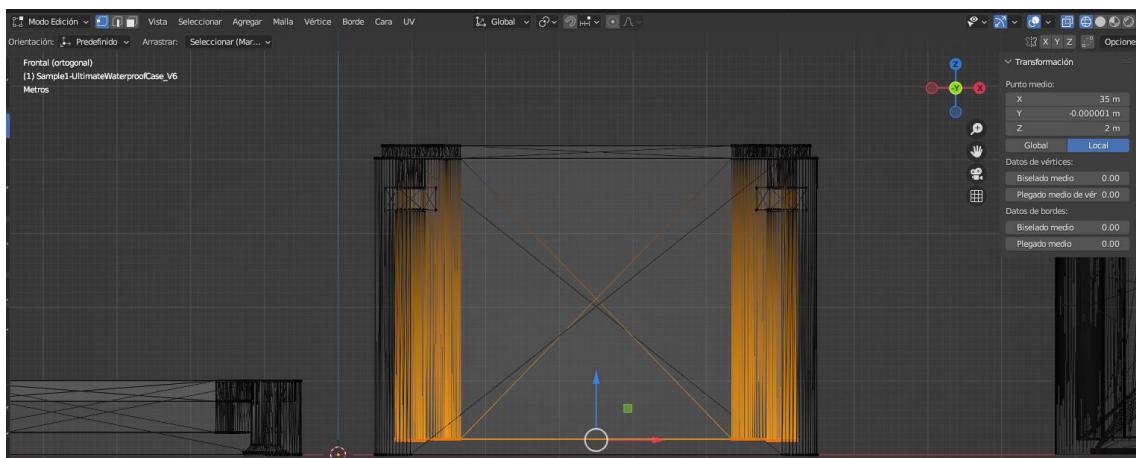


Figura 27. Modificación de la base plana

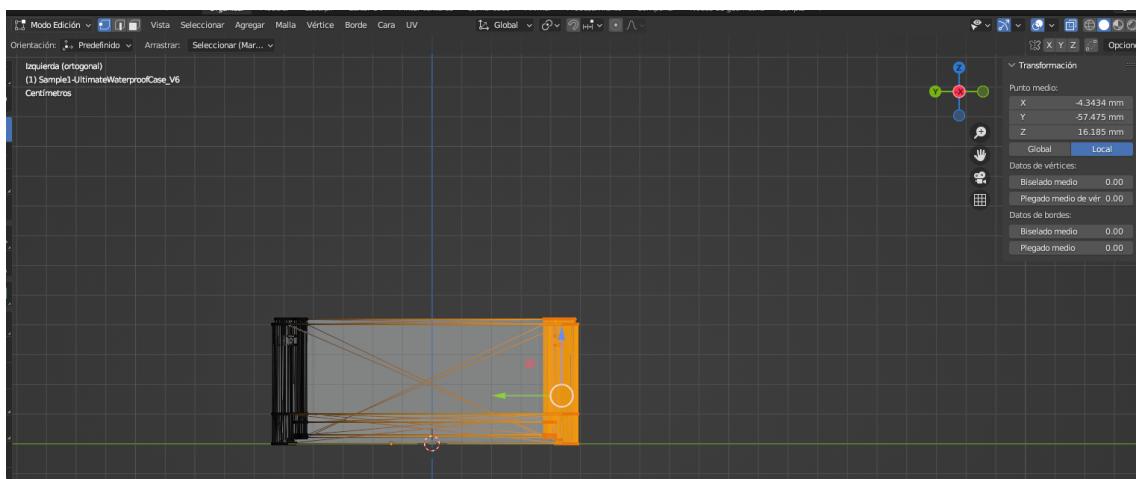


Figura 28. Modificación del largo

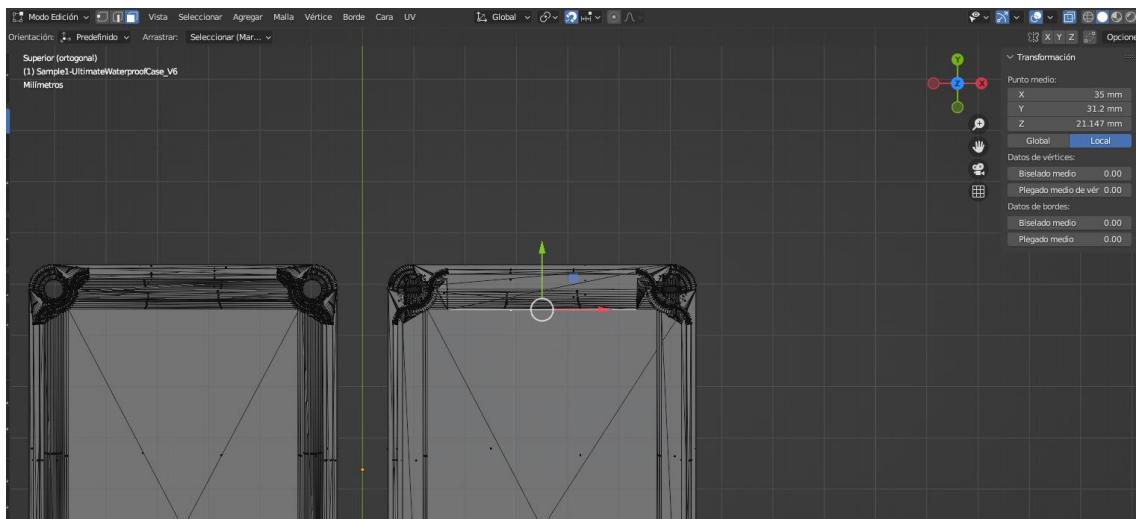


Figura 29. Modificación en la anchura de la pared

Ya con el tamaño correcto del módulo principal, se comienza con las transformaciones sobre la base recientemente construida. En primera instancia, se crea un cubo de 2 x 49 x 30 mm, con el propósito de sujetar la batería. Posteriormente, se insertará otro cubo de unas dimensiones distintas (14, 5, 38 en mm y ejes x, y, z) con la intención de poder colocar el microcontrolador Heltec ESP32 LoRa v3. El cubo estará situado para que los pines del Heltec queden encajados y no haya movimiento. El resultado de la transformación es visible en la Figura 30.

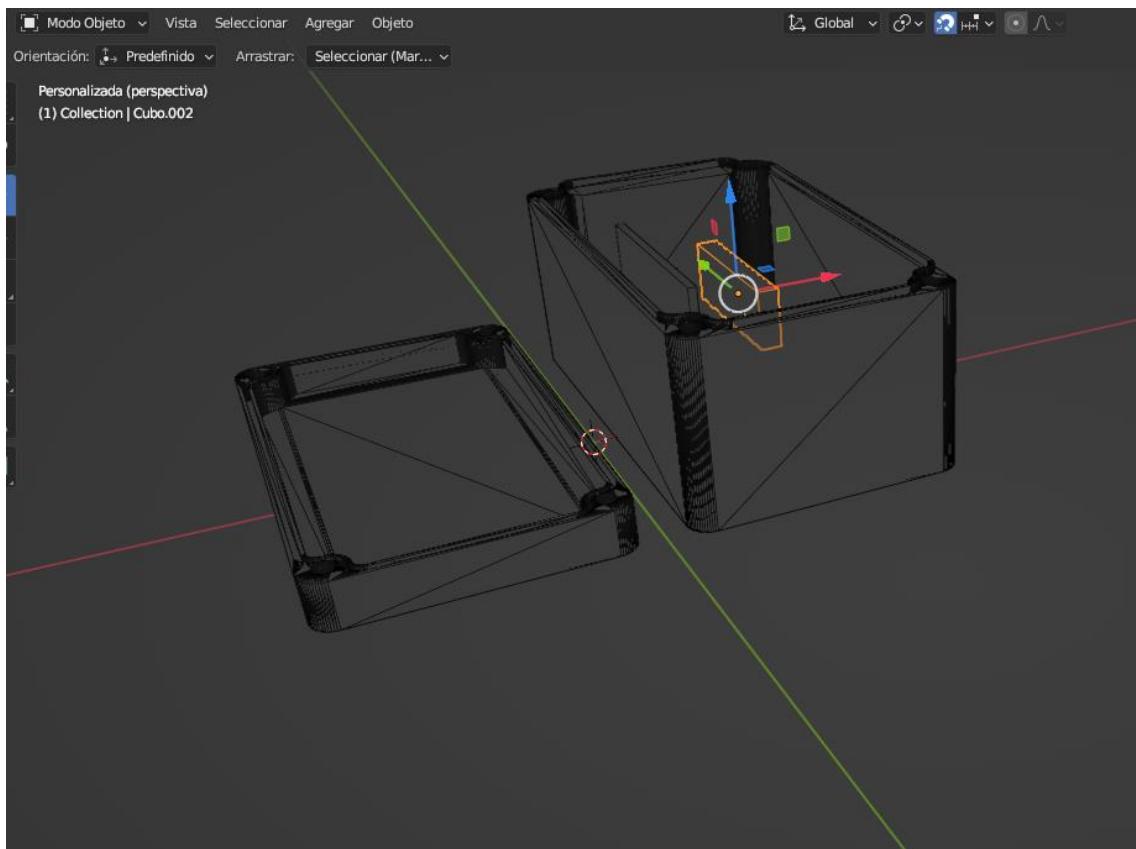


Figura 30. Colocación de elementos

Seguidamente, se comienza con las perforaciones circulares (ver Figura 31) sobre la pieza. Esto se hace con operaciones booleanas de ‘Diferencia’ sobre la pieza base respecto a los cilindros generados, observable en la Figura 32. Gracias a los huecos generados, se pueden insertar los elementos siguientes:

Conecotor de carga del dispositivo: Diámetro de 12 mm.

Botón ON/OFF: Diámetro de 12,5 mm.

Antena LoRa: Diámetro de 7,5 mm.

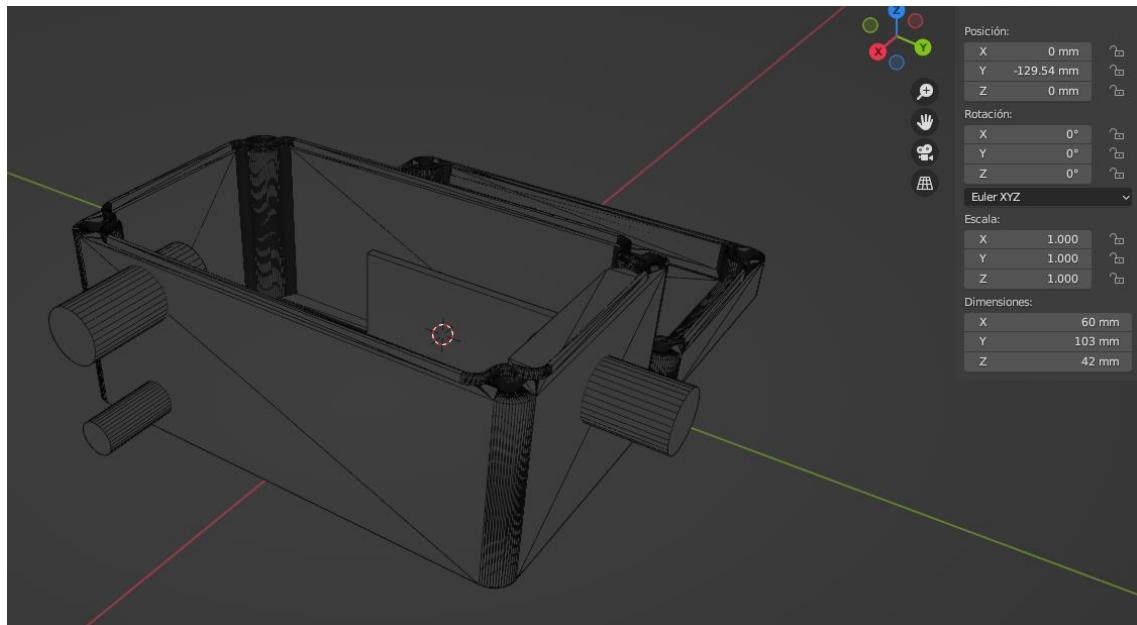


Figura 31. Elementos a perforar

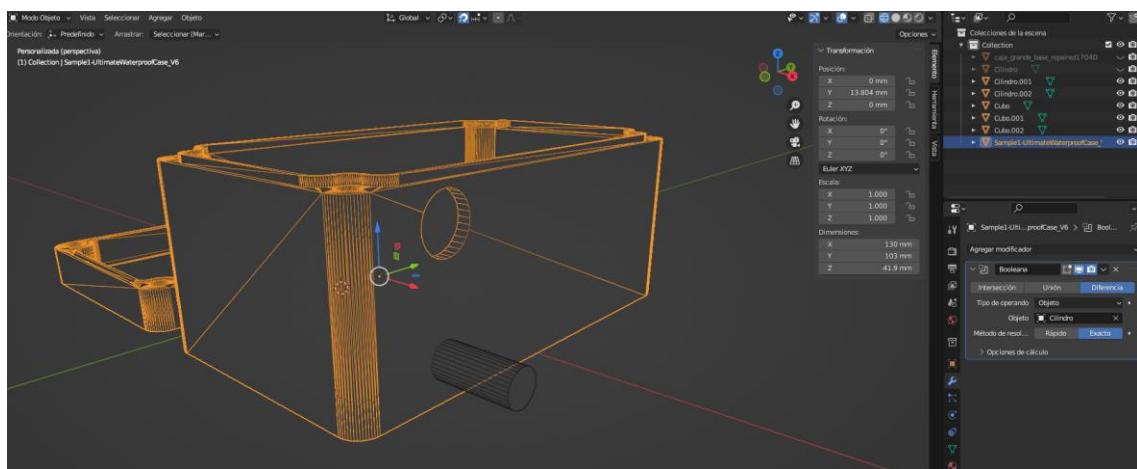


Figura 32. Perforaciones sobre el prototipo

Después de las diferencias booleanas, el módulo principal queda como en la Figura 33.

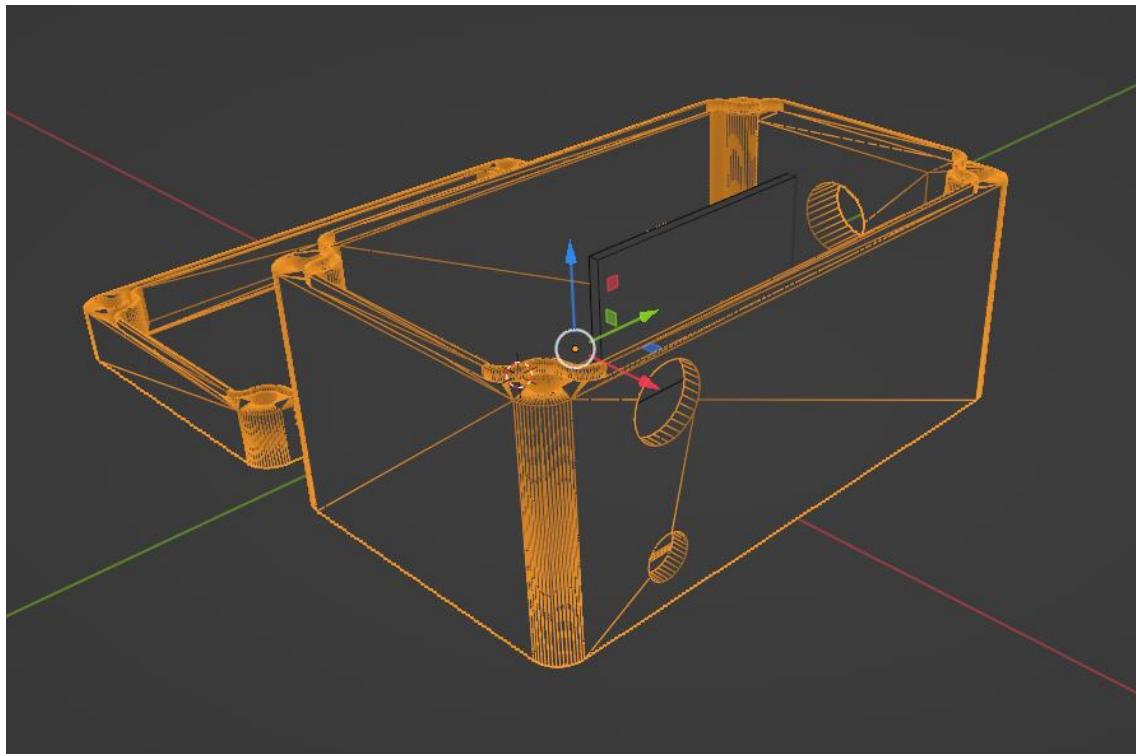


Figura 33. Módulo base agujereado

Ahora, se hace la hendidura para la pantalla del dispositivo. Se hará uso de la operación booleana ‘Diferencia’. El cubo interior cuenta con medidas de 1 x 14 x 26 mm, y el exterior de 1,25 x 28 x 34 mm. El proceso de la modificación se puede observar en la Figura 34 y Figura 35, dando como resultado la Figura 36.

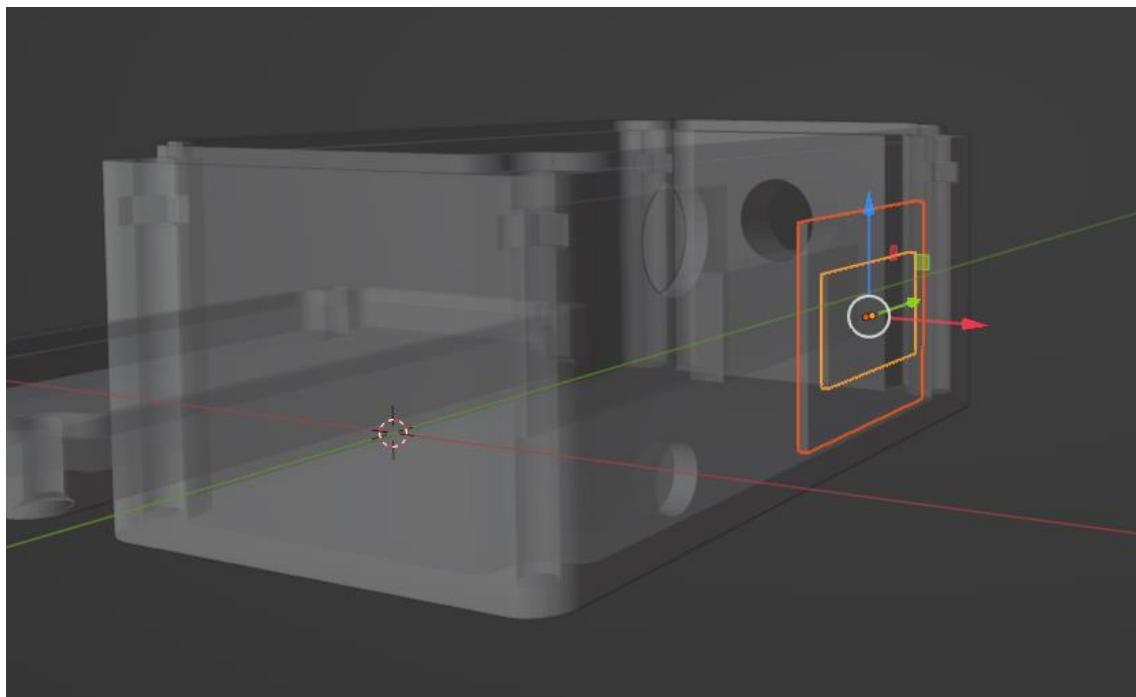


Figura 34. Biselado en el prototipo

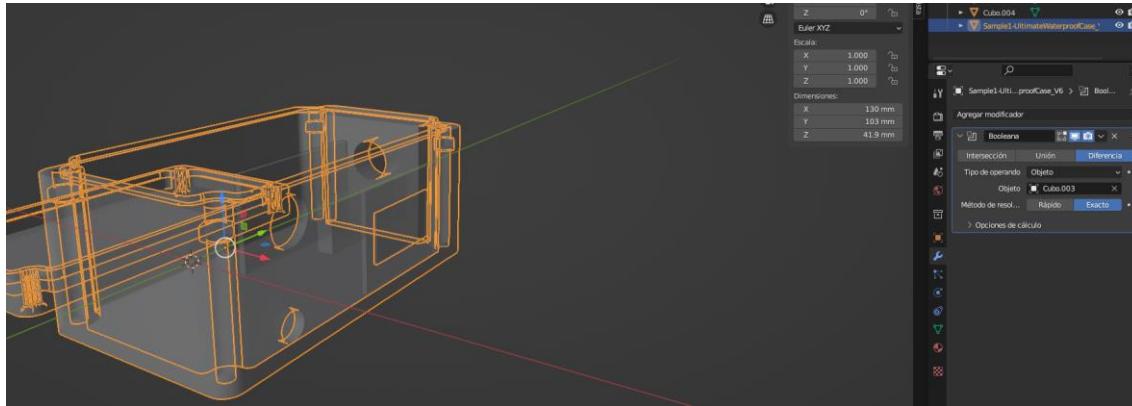


Figura 35. Operaciones booleanas

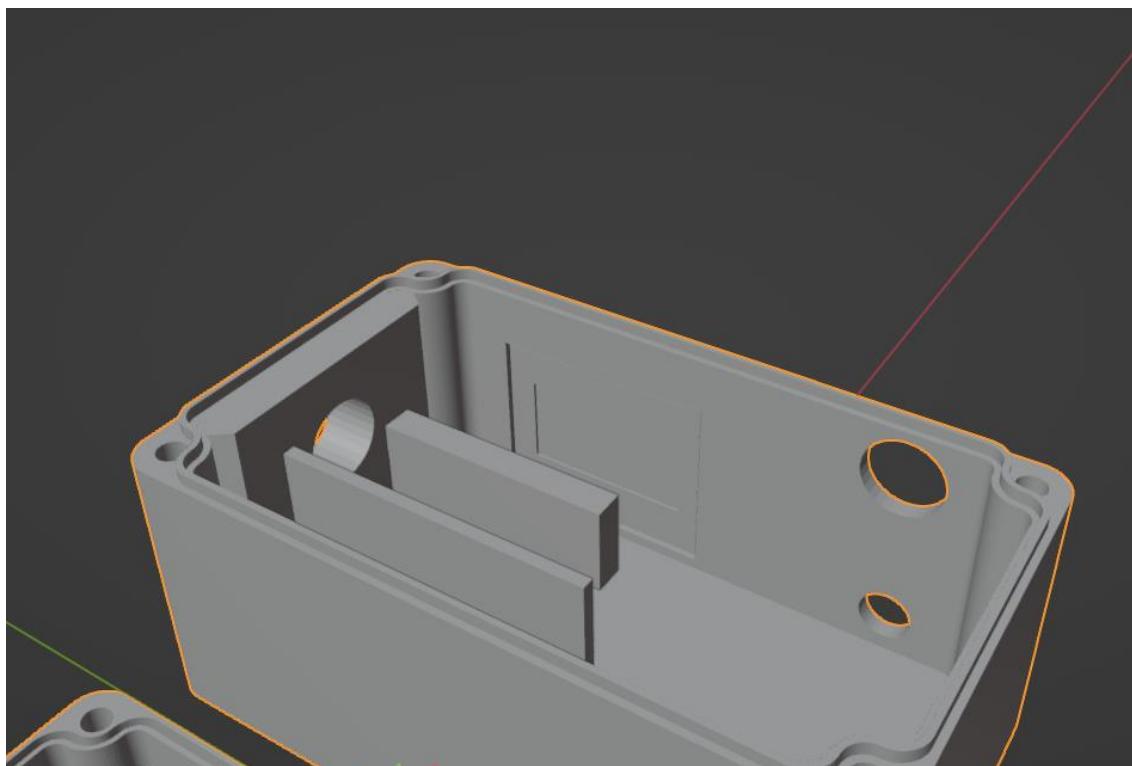


Figura 36. Prototipo con ventana

A continuación, se llega al elemento que mayor problemática implica sobre la pieza, una rosca. Utilizándola se consigue la unión entre el módulo principal y los módulos de sensores que permiten la ampliación de nuestro prototipo. Para realizar la rosca, se ha utilizado el plugin de adición de mallas ‘Bolt Factory’ [36]. Finalmente, se aplica la operación booleana de ‘Unión’, de esta manera se consigue que todas las piezas se integren en una y se obtenga la pieza base de nuestro prototipo (ver Figura 37).

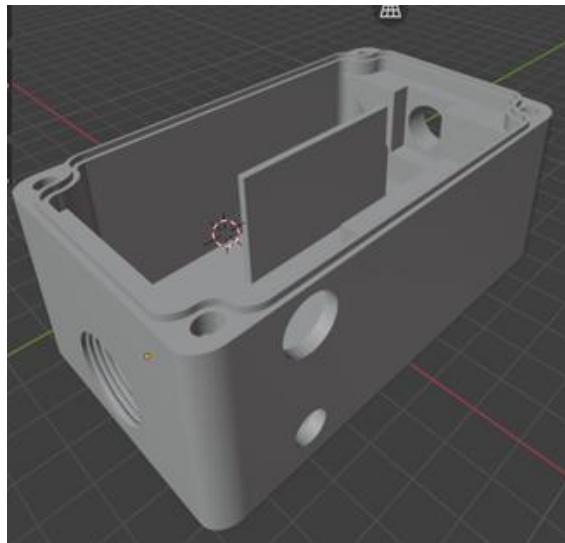


Figura 37. Prototipo final 3D

Finalmente, se adjunta un video con el time-lapse de como se ha realizado el módulo principal:

<https://youtu.be/0vAfFBSM5zU>

Anexo II: Creación del módulo de sensores

El proceso de creación del módulo de sensores ha sido desarrollado en Blender, al igual que el módulo principal. Se ha partido del mismo diseño inicial, obtenido de Thingiverse. Las operaciones para llegar al módulo de sensores son iguales al del módulo principal, lo único en lo que se puede hacer hincapié, es en la parte que enrosca.

Para hacer esta parte, se ha utilizado la operación booleana de intersección entre un cilindro de tamaño superior a la rosca y la propia rosca. De esta manera se obtiene la parte que enrosca para poder hacer uso de la modulación entre los diferentes módulos de sensores.

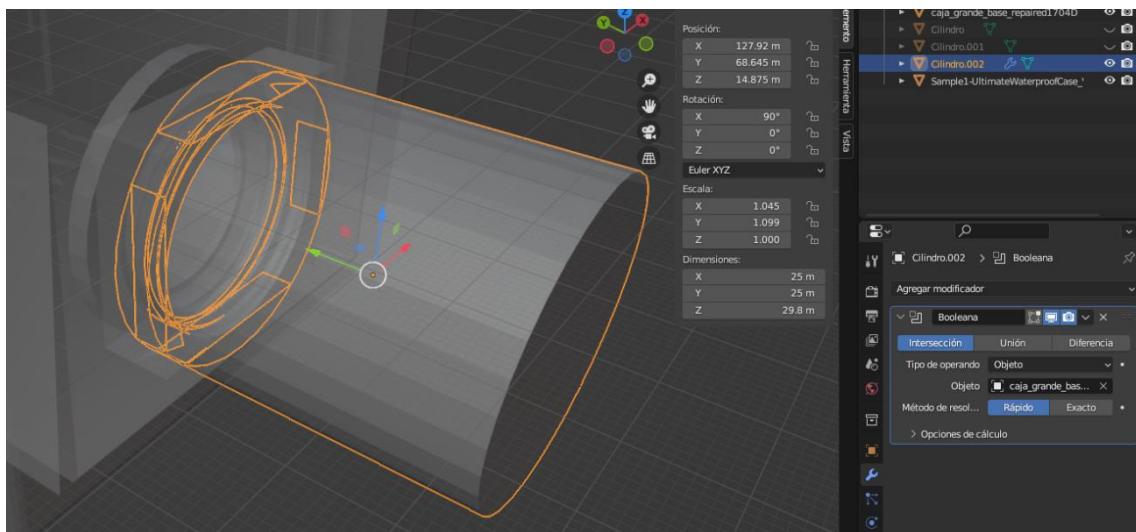


Figura 38. Creación rosca

Finalmente, se adjunta un video con el time-lapse de como se ha realizado el módulo de sensores:

<https://youtu.be/A8dKdlcRefq>