

Estudio de la agricultura regenerativa en el Olivar mediante la monitorización medioambiental





Raúl Vera García

Máster Universitario en Ingeniería
de Telecomunicación

Smart Cities

Tutor/a de TFM

Rubén Molina Casasnovas

**Profesor/a responsable de la
asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

10/06/2024

Universitat Oberta
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento *NoComercial-SinObraDerivada* [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Estudio de la agricultura regenerativa en el Olivar mediante la monitorización medioambiental.
Nombre del autor/a:	Raúl Vera García
Nombre del Tutor/a de TF:	Rubén Molina Casasnovas
Nombre del/de la PRA:	Carlos Monzo Sánchez
Fecha de entrega:	06/2024
Titulación o programa:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Smart Cities
Idioma del trabajo:	Castellano.
Palabras clave	Monitorización, Sequía, Agricultura Regenerativa, Olivar, LoRa.
Resumen del Trabajo	
<p>Este proyecto surge como respuesta a la actual sequía que afecta a la agricultura. El objetivo es comprender cómo el cambio climático incide en este sector y encontrar soluciones a los desafíos que plantea. La sequía es el principal problema actual del sector y una consecuencia destacada del cambio climático, por lo que se ha vuelto especialmente relevante.</p> <p>Este fenómeno agrava el cultivo de diversas plantas y es crucial estudiarlo para comprender el nuevo escenario climático al que la agricultura debe adaptarse. Investigar propuestas de mitigación mediante un monitoreo de sus efectos en el suelo puede proporcionar datos valiosos y abrir camino a nuevas formas de cultivo.</p> <p>Se elige el olivar tradicional debido a la zona donde se desarrolla el estudio. Este método ancestral aprovecha principalmente el agua de lluvia y es común en regiones de clima mediterráneo.</p> <p>La solución propuesta implica un sistema de transmisión de datos mediante LoRa. Este sistema consta de estaciones de medición equipadas con sensores de humedad del suelo. Los datos se envían a través de transmisores LoRa para su almacenamiento y análisis posterior, permitiendo un monitoreo en tiempo real de la situación del suelo.</p>	

El objetivo es proporcionar información precisa sobre la situación en el campo para analizar y estudiar diferentes soluciones. En concreto, en este trabajo se va a comparar los datos obtenidos de dos formas de cultivo diferentes: Olivar arado (tradicional) y Olivar regenerativo (nueva propuesta). Además, esta tecnología facilita el seguimiento del cultivo y abre la puerta a investigar otros cultivos o la evolución de los efectos del cambio climático en la agricultura.

Abstract

This project arises in response to the current drought affecting agriculture. The goal is to understand how climate change impacts this sector and find solutions to the challenges it poses. Drought is the sector's primary current problem and a prominent consequence of climate change, making it especially relevant.

This phenomenon exacerbates the cultivation of various plants, and it is crucial to study it to comprehend the new climatic scenario that agriculture must adapt to. Investigating mitigation proposals through monitoring their effects on the soil can provide valuable data and pave the way for new cultivation methods.

Traditional olive cultivation is chosen due to the study area. This ancestral method mainly utilizes rainwater and is common in Mediterranean climate regions.

The proposed solution involves a data transmission system using LoRa. This system comprises measurement stations equipped with soil moisture sensors. The data is transmitted via LoRa transmitters for storage and subsequent analysis, enabling real-time monitoring of soil conditions.

The objective is to provide precise information about the field's situation for analyzing and studying different solutions. Specifically, this work will compare data obtained from two different cultivation methods: Plowed olive orchards (traditional) and Regenerative olive orchards (new proposal). Furthermore, this technology facilitates crop monitoring and opens the door to investigating other crops or the evolution of climate change effects on agriculture.

Índice

1.	Introducción.....	5
1.1.	Contexto y justificación del Trabajo.....	5
1.2.	Objetivos del Trabajo.....	6
1.3.	Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad.....	7
1.4.	Enfoque y método seguido.....	11
1.5.	Planificación del trabajo.....	13
1.6.	Breve resumen de productos obtenidos.....	18
1.7.	Breve descripción de otros capítulos de la memoria.....	18
2.	Estado del Arte.....	20
2.1.	Enfocado al Sistema.....	20
2.1.1.	Arduino.....	20
2.1.2.	LoRa.....	23
2.1.3.	Sensores.....	26
2.2.	Enfocado al Estudio.....	27
2.2.1.	Agricultura Regenerativa.....	27
2.2.2.	IoT aplicado a la agricultura.....	29
3.	Sistema del proyecto.....	32
3.1.	Diseño.....	32
3.1.1.	Bloques.....	33
3.1.1.1.	Estaciones de Sensado.....	33
3.1.1.2.	Estación de Base.....	39
3.1.1.3.	Otros componentes.....	43
3.2.	Implementación.....	43
3.3.	Pruebas.....	69
3.4.	Resultados.....	75
4.	Estudio.....	77
4.1.	Datos del Estudio.....	77
4.2.	Resultados.....	78
5.	Resultado Global.....	81
6.	Conclusiones.....	84

7. Trabajos futuros.....	87
8. Glosario	89
9. Bibliografía.....	90
10. Agradecimientos	93
11. Anexos	94
11.1. Comparación LoRa VS Sigfox	94
11.2. Calibración de los sensores de humedad	95
11.3. Códigos	100

Lista de Figuras

Figura 1. Logo Agenda 2030.....	11
Figura 2. Logo Arduino.....	20
Figura 3. Tipos de Arduino.....	22
Figura 4. Logotipo de la tecnología LoRa.....	23
Figura 5. Tecnología LoRa en la Agricultura.....	25
Figura 6. Sensores para Arduino.....	26
Figura 7. Olivar Regenerativo. Arahal (Sevilla).....	29
Figura 8. IoT en la agricultura.....	30
Figura 9. Esquema del Sistema Completo.....	32
Figura 10. Esquema de una Estación de Sensado.....	33
Figura 11. Microcontrolador. Arduino NANO.....	34
Figura 12. Subsistema implantado en la protoboard.....	35
Figura 13. Modulo SX1276 de LoRa para Arduino.....	36
Figura 14. Sensor de humedad FC-28 para Arduino.....	36
Figura 15. Batería para la alimentación de las estaciones de medición del sistema.....	37
Figura 16. Envase reciclado elegido para el encapsulado.....	38
Figura 17. Planteamiento esquemático del encapsulado.....	39
Figura 18. Esquema de la Estación base.....	40
Figura 19. Microcontrolador. Arduino NANO.....	41
Figura 20. Modulo SX1276 de LoRa para Arduino.....	42
Figura 21. Microcontrolador implementado en la protoboard.....	44
Figura 22. Programa inicial para la lectura de Sensor.....	45
Figura 23. Voltaje parásito en las puertas analógicas.....	46
Figura 24. Cortocircuito al someter la resistencia a 0V.....	46
Figura 25. Valor de R.....	47
Figura 26. Similitud entre situación real e ideal.....	47
Figura 27. Resultados de las pruebas con distintos valores de R. 220Ω en A0 y 1MΩ en A7.....	48
Figura 28. Solución al valor de R para el voltaje parásito.....	49
Figura 29. Módulo LoRa implementado con el microcontrolador en la placa de pruebas.....	49
Figura 30. Programa Hola Mundo de TX y RX en LoRa.....	51
Figura 31. Prueba de Hola Mundo exitosa.....	51
Figura 32. Transformación del envase para las diferentes situaciones.....	53
Figura 33. Fase inicial de la adaptación del envase.....	54
Figura 34. Apertura del encapsulado para la introducción del subsistema.....	55
Figura 35. Encapsulado complementado con las carcasas de las baterías.....	55
Figura 36. Resultado final del encapsulado.....	56
Figura 37. Subsistema o hardware de las estaciones de sensado.....	57
Figura 38. Explicación de la orientación de los sensores dentro del suelo.....	57
Figura 39. Subsistema dentro del encapsulado.....	58
Figura 40. Sistema desgranado.....	59
Figura 41. Estación de medida TX1 instalada.....	60

Figura 42. Plano del olivar del estudio.	61
Figura 43. Instalación de estaciones en el olivar.	61
Figura 44. Estación base instalada en una sala del caserío.	62
Figura 45. Lectura de datos del estudio.	63
Figura 46. Código EB parte 1.	63
Figura 47. Código EB parte 2.	64
Figura 48. Código EB parte 3.	64
Figura 49. Código TX1 parte 1.	66
Figura 50. Código TX1 parte 2.	66
Figura 51. Código TX1 parte 3.	66
Figura 52. Código TX1 parte 4.	67
Figura 53. Código TX1 parte 5.	68
Figura 54. Código TX1 parte 6.	68
Figura 55. Primer modelo de sensor de humedad.	69
Figura 56. Primeras pruebas de distancia del módulo de transmisión.	71
Figura 57. Prueba de la transmisión a 1.48 km de distancia.	72
Figura 58. Área regenerativa del olivar de estudio.	73
Figura 59. Resultado final estaciones instaladas.	75
Figura 60. Comparación datos estación TX1.	81
Figura 61. Comparación datos estación TX2.	82
Figura 62. Comparación datos de estaciones.	82
Figura 63. Agricultura regenerativa.	84
Figura 64. IoT en la agricultura.	85
Figura 65. Módulo RTC.	87
Figura 66. Estación con sensor de temperatura.	88
Figura 67. Profundidad sensores.	88

1. Introducció

En este primer capítulo de la memoria se va a contextualizar y justificar la realización del presente trabajo. En las siguientes secciones, se va a exponer información sobre los diferentes objetivos que se pretenden alcanzar, su posible impacto en distintos ámbitos, la planificación de las fases y sus tareas, entre otros. En resumen, se muestra un compendio de información que ayudan a comprender este proyecto.

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

Actualmente, nos encontramos en un mundo cada vez más digital. Han sido muchos los adelantos que se han podido ver en el área de Smart-Cities como la implementación de sistemas de transporte público inteligente, la optimización del consumo energético a través de tecnologías de gestión de la energía, la mejora en la gestión de residuos mediante sensores y sistemas de recogida automatizados, y la creación de plataformas digitales para la participación ciudadana en la toma de decisiones urbanas.

Estas novedades, que ayudan al avance y mejora de las condiciones humanas y ambientales, aún se resisten en las zonas rurales donde la innovación encuentra cierta resistencia con lo tradicional. La escasa inversión e investigación en estas áreas más despobladas y sus actividades económicas contrasta con las necesidades de las grandes urbes.

Es por ello que hay varias razones que motivan la realización de este trabajo final. En primer lugar, se busca impulsar el concepto de Smart rural y abrir un camino para la implementación de nuevas tecnologías en la vida rural con el objetivo de mejorar y facilitar las condiciones existentes. En concreto para el presente caso, en la actividad agrícola.

En segundo lugar, dado el actual momento de sequía al que se enfrenta el campo, es necesario conocer la información real de la situación hídrica de este. Es por ello que surge la idea de un sistema que permita conocer mejor las condiciones reales del suelo para actuar de manera adecuada. Esto ayudaría a mejorar el cuidado y seguimiento de las cosechas, incrementando su rendimiento. Con este sistema, se realizaría un estudio que permitiría conocer de forma más precisa los efectos de la sequía, el cambio climático y la nueva realidad en la que se encuentra el campo, contribuyendo así a una gestión más eficaz y sostenible de los recursos naturales en las zonas rurales.

En esta misma línea, se aprovecha esta idea para llevar a cabo un estudio comparativo que compruebe con datos reales cómo las nuevas soluciones existentes mejoran las condiciones frente a la forma tradicional. En concreto, el caso de la agricultura regenerativa.

La agricultura regenerativa es una nueva forma propuesta por el sector ecológico, que consiste en mantener la vegetación silvestre entre los cultivos. De esta forma, se consigue mantener el hábitat de especies insectívoras que ayudan a la buena salud del suelo y logra conservar el agua en este al crear una capa vegetal que lo cubra. Este último punto es lo que este trabajo pretende investigar con datos reales que permitan tener más información al respecto.

Finalmente, es interesante mostrar cómo sin grandes infraestructuras, se puede conseguir cubrir ciertas necesidades actuales del sector agrícola. De esta forma se anima a la población de zonas rurales a incorporar poco a poco las nuevas herramientas que nos ofrece la era digital, para tener cada vez unas zonas rurales más conectadas con el mundo de la tecnología.

1.2. Objetivos del Trabajo

En este apartado se establecen los objetivos que se aspiran a alcanzar con la realización de este proyecto.

Objetivo General

El objetivo general de este proyecto es realizar un estudio, que por una parte revele datos sobre los efectos de la sequía en el campo, y, por otro, se establezca una comparación entre dos métodos distintos de cultivo del olivar, de forma que se revele cuál es la mejor opción para la nueva situación climática.

El camino para hacer esto posible no es otro que el diseño y uso de un sistema IoT para realizar un monitoreo de la situación hídrica real del campo, recolectando y analizando esos datos, para realizar y establecer conclusiones del estudio.

Objetivos Específicos

Este proyecto incluye una serie de objetivos concretos alineados con el objetivo general, que se exponen a continuación:

- Diseñar un sistema de transmisión LoRa, mediante el que se recojan datos y se envíen a un receptor conectado a un terminal donde se almacenaran y analizaran los datos para su posterior uso.

- Implementar dicho diseño. Obteniendo un producto de calidad, que se haya testeado mediante pruebas de funcionamiento.
- Recopilar los datos obtenidos mediante el sistema.
- Analizar, interpretar y concluir la información obtenida de los datos.
- Exponer de forma sencilla los resultados y conclusiones del estudio y el trabajo.

1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Como en todos los proyectos, es necesario reflexionar sobre los posibles impactos ocasionados en el ámbito de la sostenibilidad, ético-social y aspectos relativos a la diversidad. En todo proyecto, a pesar de que el propósito final se estime como un beneficio para un sector, puede acarrear ciertos aspectos negativos que no compensen los aspectos positivos que conlleva su realización [R1].

Dentro de los objetivos de este trabajo está la alineación con la competencia de compromiso ético y global (CCEG). En este documento, se van a analizar las dimensiones mencionadas anteriormente que aborda la CCEG, diferenciándose en tres etapas del proyecto: Diseño, Desarrollo y Conclusión.

Etapas de Diseño

En esta etapa es muy importante tener en cuenta estos aspectos, ya que puede ser decisivo para evitar resultados colaterales negativos referentes a las dimensiones que se estudian en este apartado.

Se expone en las siguientes líneas las dimensiones a analizar en esta etapa del proyecto.

- **Dimensión de Sostenibilidad**

En lo relativo a la sostenibilidad, se puede afirmar que prácticamente todo proyecto de índole tecnológica afecta al medioambiente. Esto es porque para conseguirlo se deben hacer uso de diversos recursos y esto implica directamente un efecto, normalmente negativo, en el entorno. Se trata de la huella que implica el hardware (parte física) de todo sistema de telecomunicación.

En concreto, para este trabajo se va a hacer uso de diferentes dispositivos tecnológicos (Microcontroladores, sensores, Transmisores, cables, etc.) cuya fabricación y exportación generan consumo energético, residuos, contaminación, agotamiento de materias primas. A esto debe añadirse, que al final de la vida útil de cada uno puede convertirse en nuevos residuos.

Para estos casos, existe una legislación, que, si bien no elimina del todo los aspectos negativos, sí los reduce. Un ejemplo claro, sería el reciclaje de materiales al final de la vida útil. Se contribuye así reduciendo residuos y contaminación, y otorgando una nueva vida útil a ciertos dispositivos.

Entre las legislaciones existentes, se toma de referencia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) previstas en la Agenda 2030 por la ONU. De entre todos estos objetivos, referentes a sostenibilidad, se abordan los siguientes:

- **ODS 12: Producción y consumo responsables**

Este objetivo se enfoca en promover patrones de producción y consumo más sostenibles, lo que implica hacer más y mejor con menos recursos, reducir los residuos y la contaminación, y aumentar la eficiencia en el uso de los recursos. Concretamente, este trabajo aborda de forma fundamental la meta de *Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales*.

En lo que concierne a este proyecto, el recurso que es objeto de estudio para su uso eficiente es el Agua.

- **ODS 13: Acción por el clima**

Este objetivo se centra en la toma de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos. Entre las metas que se integran dentro de este objetivo están: *Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los impactos del cambio climático e Integrar medidas relacionadas con el cambio climático en las políticas, estrategias y planificaciones nacionales*.

En lo que concierne a este proyecto, se pretende realizar un estudio real de la situación en el campo en lo referente al agua, y ayudar a establecer planes que ayuden a la agricultura.

- **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres**

Este objetivo busca proteger, restaurar y promover un uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la

desertificación, detener e invertir la degradación del suelo y detener la pérdida de biodiversidad.

En lo que concierne a este proyecto, se va a realizar un estudio de lo que se conoce como agricultura regenerativa. Esta permite dejar crecer plantas silvestres en cultivos, favoreciendo la biodiversidad en el campo. Aunque en menor medida, sí es cierto que puede considerarse que contribuye a alcanzar las metas integradas en este.

Una vez abordado la parte legislativa, se puede hacer un análisis más exhaustivo de los aspectos negativos y positivos que conlleva el proyecto y cómo minimizarlos en la etapa de diseño.

Principalmente, los impactos negativos se deben a la propia fabricación y exportación de materiales necesarios para la implementación del sistema. Es por ello por lo que en este punto no se ha podido reducir la huella ecológica.

Sin embargo, sí se ha tenido en cuenta en las fuentes de energías que se emplearán en las estaciones de medida. De esta forma, en lugar de hacer uso de una batería de 9V convencional, se ha optado por una batería de 9V recargable. Se consigue así, reducir el impacto que supone un recambio continuo de baterías desechables.

En cuanto a los impactos positivos, se pueden identificar fácilmente debido a que este trabajo se concibe como una solución a conocer y tratar los efectos del cambio climático en la agricultura. El proyecto pretende realizar un seguimiento continuo de la situación hidrológica en el campo de modo que por un lado se puede analizar su estado frente a la actual sequía (efecto del cambio climático) y conocer así sus efectos, y por otro, realizar un estudio de nuevas formas de cultivar para el ahorro del agua y crecimiento de la biodiversidad.

Este proyecto busca conseguir los objetivos positivos expuestos anteriormente, ya que estos son la motivación principal de este trabajo aportando ayuda a la gestión sostenible del agua en la agricultura, adaptándose al cambio climático e investigando propuestas para proteger al medio ambiente.

- **Dimensión comportamiento ético y de responsabilidad social (RS).**

El resultado de este trabajo no tiene ningún impacto ni positivo ni negativo en aspectos ético-sociales. Esto se debe a que, al tratarse de un proyecto puramente técnico, no interfiere en los asuntos relacionados con esta dimensión.

No obstante, sí podría decirse que este proyecto está enfocado a crear beneficio a la sociedad al estudiar su entorno para gestionar eficientemente sus recursos. Por

tanto, se puede determinar que sí existe alguna preocupación con la sociedad, que en este documento se ha categorizado en la dimensión de sostenibilidad.

Igualmente, cara al futuro, cabe mencionar la posibilidad de que en el caso de que el sistema que se ha diseñado se implantara, este podría generar puestos de trabajo para que personas lo gestionaran y analizaran los datos. En este supuesto, ayudaría al objetivo ODS de esta dimensión *ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico*.

▪ **Dimensión diversidad, género y derechos humanos.**

El resultado de este trabajo no tiene ningún impacto ni positivo ni negativo en aspectos de género, diversidad (raza, religión, orientación sexual, funcional, etnia, ideología...) o derechos humanos, o en aspectos de accesibilidad, discapacidad, ergonomía y seguridad de los datos y las TIC. Por tanto, no tiene impacto en ninguno de los ODS de esta dimensión.

Esto se debe a que, al igual que en el caso anterior, al tratarse de un proyecto puramente técnico, no interfiere en los asuntos relacionados con esta dimensión. Ni en esta etapa, ni en las dos siguientes.

Etapa de Desarrollo

Expuestos y explicados los puntos en la etapa anterior, se van a indicar, a continuación, los impactos en la etapa de desarrollo de una forma más simple. Por tanto, se expone en las siguientes líneas las dimensiones analizadas en esta etapa del proyecto.

▪ **Dimensión de Sostenibilidad**

En lo relativo a la sostenibilidad, se puede afirmar que prácticamente se ha mantenido lo indicado en la etapa de diseño, por tanto, se mantienen los mismos objetivos, referentes a sostenibilidad, que en dicha etapa:

- **ODS 12: Producción y consumo responsables**
- **ODS 13: Acción por el clima**
- **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres**

Además, habría que añadir como impacto positivo la selección de material reciclado, en este caso, botellas de PEAD (conocidas comúnmente como *botellas de plástico*) para el encapsulado del sistema. Concretamente, para las balizas o estaciones de medida. Se contribuye de esta forma aún más a lograr estos objetivos.

- **Dimensión comportamiento ético y de responsabilidad social (RS).**

Referente a esta dimensión, se mantiene lo expuesto en la etapa anterior.

- **Dimensión diversidad, género y derechos humanos.**

Referente a esta dimensión, se mantiene lo expuesto en la etapa anterior.

Etapa de Conclusiones

En esta etapa final del proyecto se puede afirmar que, en relación a este apartado del proyecto, se mantiene el mismo espíritu de contribución con los objetivos de la Agenda 2030. Por tanto, se mantiene todo lo expuesto en las dos etapas previas.



Figura 1. Logo Agenda 2030

1.4. Enfoque y método seguido

En el contexto del enfoque y método escogidos para la ejecución del TFM, se han barajado varias estrategias posibles para llevar a cabo el proyecto. Concretamente, se ha optado *por adaptar un producto existente*.

Los motivos por los que se ha escogido esta opción son varios. En primer lugar, se descarta el desarrollo de un nuevo producto desde cero ya que el proyecto tiene unos límites temporales y económicos que hacen inviable escoger esta opción. En segundo lugar, tampoco se considera utilizar soluciones disponibles en el mercado. Esto es debido a que estas vienen dadas para unas determinadas condiciones, y al tratarse de un proyecto de investigación la capacidad de adaptación del producto es

vital. Esto no podría darse con esta opción, por lo que se escoge adaptar un producto existente.

Esta decisión se basa en varios factores:

- Eficiencia y rapidez: Adaptar un producto existente es más eficiente en términos de tiempo y recursos en comparación con el desarrollo de un producto nuevo desde cero. Esto permite avanzar rápidamente en la implementación del proyecto y maximizar el tiempo disponible para la investigación y análisis.
- Tecnología probada: Utiliza tecnologías y metodologías ya probadas y validadas en otros contextos. Esto reduce el riesgo de fallos técnicos y garantiza una mayor fiabilidad en la recolección de datos.
- Flexibilidad y personalización: Permite una mayor flexibilidad en la implementación y la capacidad de adaptarse a las condiciones y requisitos cambiantes de forma que el producto final se ajuste a los objetivos del proyecto.

En conclusión, se puede afirmar que adaptar un producto existente se considera la estrategia más apropiada para este proyecto, ya que ofrece una combinación de eficiencia, fiabilidad y flexibilidad necesarias para cumplir con los objetivos de implementación de tecnologías de monitorización en agricultura de manera efectiva.

Escogido el método, el trabajo se enfoca en dos partes. La primera, en todo lo concerniente al sistema, y la segunda, todo lo que engloba el estudio.

En el primer caso, la idea es realizar el sistema con el que se llevará a cabo el estudio. El enfoque en este caso es crear un sistema sencillo, dividido en módulos que conformarán los bloques de las estaciones. Estas estaciones serán, por un lado, las que realicen el sensado y la transmisión de datos (estaciones de sensado) y por otro, la recolección de datos.

Se propone para el control del bloque, la tecnología Arduino. De forma que mediante microcontroladores se conseguirá un sencillo control con eficiencia energética. Por otra parte, para el sensado se tomará el modelo de sensores de humedad de suelo que se estime oportuno, existentes en el mercado. Finalmente, y la parte quizás más interesante del sistema, la forma comunicación entre los módulos.

Para esta parte funcional del sistema, se barajan dos posibilidades muy prometedoras: la tecnología LoRa y la tecnología SigFox. Ambas ofrecen características muy alineadas con las necesidades del sistema. Para discernir entre ambas y tomar una como solución, se realiza una comparación de las cualidades que ofrecen.

Tras este exhaustivo estudio, se determina que la tecnología LoRa es la más adecuada para la situación del proyecto. El motivo principal, es que esta tecnología ofrece una mayor flexibilidad, la cual es una característica fundamental en este proyecto. También, se ha tenido en cuenta para la toma de decisión, entre otros motivos, el soporte o el gasto económico de ambas propuestas. Se muestra al final de la sección, un cuadro resumen comparativo de ambas tecnologías.

En el segundo caso, referente al enfoque, tenemos el estudio. De forma breve, la idea es la recolección de datos reales de la situación hídrica del suelo para dos formas de cultivo: la tradicional y la regenerativa. De esta forma se pretende, por un lado, conocer la situación real del suelo, y, por otro, establecer una comparación entre ambas.

Con todo ello, se obtendrán resultados y conclusiones que ayudarán al sector agrario a tomar las decisiones oportunas al respecto.

1.5. Planificación del trabajo

La planificación del proyecto es crucial para alcanzar los objetivos en los espacios temporales establecidos. Para facilitar la planificación, el trabajo se va a dividir en fases. Estas a su vez se dividirán en tareas a realizar, de modo que una vez completadas estas, se pasará a la siguiente fase.

En las tareas que se considere posible, se van a realizar en paralelo para adelantar todo lo posible. De esta forma se crea un margen de seguridad en caso de algún retraso.

Se exponen, a continuación, las 5 fases en las que se divide el proyecto:

▪ FASE 0: INICIO DEL PROYECTO.

Es la fase inicial del proyecto. En esta se contempla la definición de este, su planificación y una investigación sobre la actualidad del tema que se va a abarcar (Estado del Arte). De esta forma, se ponen los cimientos para poder empezar a trabajar.

En esta fase se contemplan las siguientes tareas:

- Definición del proyecto: En esta tarea se definen los puntos básicos de todo proyecto: qué objetivos se quieren alcanzar, de qué manera y en qué plazo.

- Planificación: En esta tarea, primero, se va a estudiar el plazo para la realización del proyecto y las tareas a realizar. Se asignarán a cada tarea una parte temporal del plazo existente para acometer el trabajo. Además, estas tareas se agruparán en fases progresivas para conocer de forma sencilla el avance del proyecto.
- Estudio del Estado del Arte: En esta tarea se realizará una investigación del estado actual de los temas y tecnologías que se van a abordar. Una vez realizada, se revisan los primeros pasos realizados del trabajo, por si se necesitara actualizar o realizar algún cambio en algún punto.

▪ **FASE 1: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.**

Es la primera fase del proyecto como tal. Abarca todo lo relacionado con la fabricación del sistema, desde el diseño y la selección de componentes hasta su implementación.

En esta fase se contemplan las siguientes tareas:

- Diseño del sistema: En esta tarea se lleva a cabo diseño de todo el sistema, tanto de sensado como de transmisión, de forma que sean uno. No obstante, cada tarea se va a dividir en un módulo, que se unirán en un mismo bloque. Con esto se garantiza un sistema que ofrece flexibilidad a posibles cambios (*divide et vinces*). Todo este planteamiento se va a madurar y gestionar en esta tarea.
- Obtención de materiales: En esta tarea se realiza una búsqueda y comparación de componentes que formaran la parte física del diseño del sistema, de manera que se escojan los que mejor se adapten a las necesidades del sistema.
- Implementación del sistema: En esta tarea, una vez definido el diseño y obtenidos los materiales y componentes que conformarán el sistema, se procede a encajar cada parte y completar el sistema. Primero, se va a montar la parte física, y más tarde, la tarea se enfocará en programar y configurar el sistema. En esta tarea también se incluyen pequeñas pruebas para comprobar que, en cada paso de la implantación, todo funciona correctamente.

▪ **FASE 2: PRUEBAS DEL SISTEMA.**

Es la segunda fase del proyecto. Abarca todo lo relacionado con las pruebas del sistema (a nivel global).

Todo se condensa, en principio, en una tarea:

:

- Pruebas y Análisis: En esta tarea se pondrá a prueba el sistema, tanto su parte de transmisión como de sensado. Además, se analizarán los primeros datos para comprobar su fiabilidad. Se realizarán todas las pruebas que se consideren oportunas para comprobar el funcionamiento y la calidad del sistema.

▪ **FASE 3: REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.**

Es la tercera fase del proyecto, y la de mayor duración. En esta se llevará a cabo el estudio completo que persigue este proyecto.

En esta fase se contemplan las siguientes tareas:

- Estudio (Recopilación de datos): En esta tarea se van a recopilar los datos enviados desde las *estaciones* (bloque de sensado + transmisor) ubicadas en los diferentes olivares hasta la *estación base* (Bloque receptor). Es decir, se va a poner en marcha el sistema, y se realizará un seguimiento del comportamiento del sistema a la vez que se recogen datos del estudio.
- Análisis de datos: En esta tarea, una vez obtenido una buena cantidad de datos, se pasará a analizar e interpretar los datos. Estos se expondrán de forma gráfica y tabulada para la obtención de conclusiones.
- Conclusión de datos: Finalmente, en esta tarea se obtendrán las conclusiones oportunas procedente de la información del estudio en todas sus facetas.

▪ **FASE 4: FIN DEL PROYECTO.**

Es la cuarta y última fase del proyecto. En esta ya se ha concluido el estudio y se realiza la entrega de la memoria final, que se ha ido completando con cada tarea realizada.

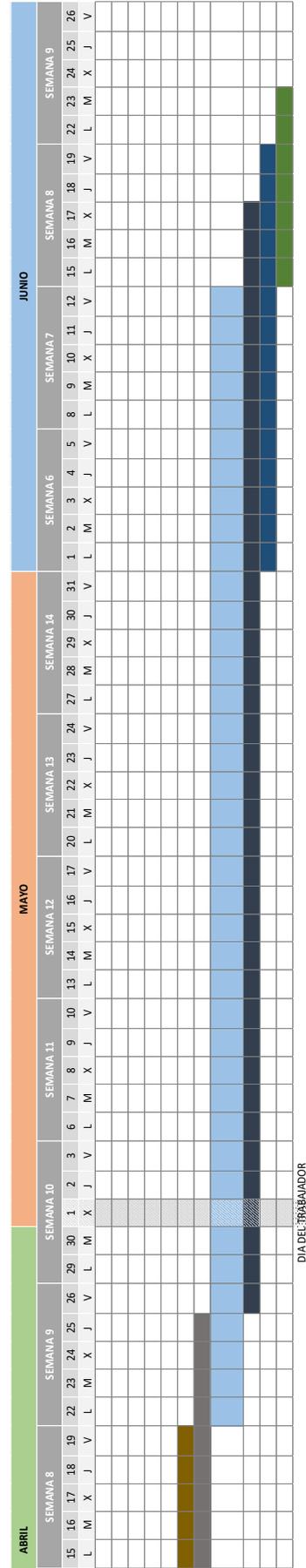
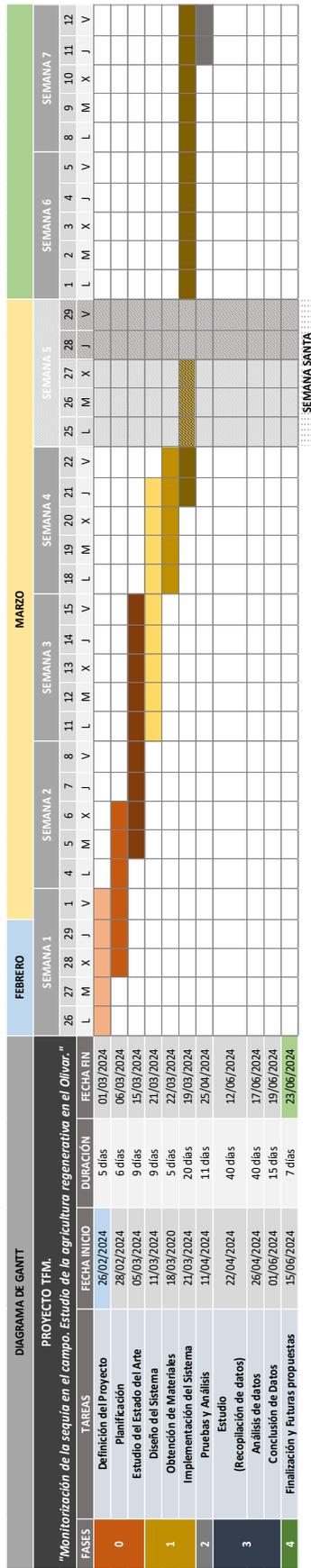
En esta fase se contempla la última tarea:

- Finalización y Propuestas de Futuro: En esta tarea se expondrá mediante una presentación, todo el proceso del proyecto y su conclusión final. Además, se aportarán propuestas futuras para continuar este trabajo.

Se expone en la siguiente tabla toda la información relativa a la planificación:

PROYECTO TFM. <i>"Monitorización de la sequía en el campo. Estudio de la agricultura regenerativa en el Olivar."</i>				
FASES	TAREAS	FECHA INICIO	DURACIÓN	FECHA FIN
0	Definición del Proyecto	26/02/2024	5 días	01/03/2024
	Planificación	28/02/2024	6 días	06/03/2024
	Estudio del Estado del Arte	05/03/2024	9 días	15/03/2024
1	Diseño del Sistema	11/03/2024	9 días	21/03/2024
	Obtención de Materiales	18/03/2020	5 días	22/03/2024
	Implementación del Sistema	21/03/2024	20 días	19/03/2024
2	Pruebas y Análisis	11/04/2024	11 días	25/04/2024
3	Estudio (Recopilación de datos)	22/04/2024	40 días	12/06/2024
	Análisis de datos	26/04/2024	40 días	17/06/2024
	Conclusión de datos	01/06/2024	15 días	19/06/2024
4	Finalización y propuestas de futuro	15/06/2024	7 días	23/06/2024

Se incluye un diagrama de Gantt, en la siguiente página, para facilitar la comprensión temporal del TFM expuesta en este apartado:



1.6. Breve resumen de productos obtenidos

En este apartado se detallan los diversos productos derivados de la ejecución del proyecto. Entre los objetivos principales del proyecto consiste en desarrollar un producto o sistema capaz de llevar a cabo la captación (sensado), transmisión, procesamiento y almacenamiento de datos con el fin de facilitar su posterior análisis e interpretación. Este producto se compone principalmente de dos subproductos o subsistemas que abarcan la totalidad del sistema:

- Subsistema de sensado y transmisión: Su función primordial es la recopilación de datos provenientes de los sensores de humedad y su posterior transmisión utilizando la tecnología de comunicación LoRa, con el propósito de almacenarlos y analizarlos posteriormente.
- Subsistema de recepción: Este subsistema se encarga de recibir los datos transmitidos, para poder almacenarlos y facilitar su interpretación, y de esta forma, ayudar a generar diversas acciones o respuestas en función de los valores obtenidos.

En los siguientes capítulos se procederá a detallar exhaustivamente cada uno de estos productos.

1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

La memoria se estructura en un total de seis capítulos, acompañados de un glosario, bibliografía, una lista de las ilustraciones utilizadas a lo largo del documento. Así como Anexos, que completan esta memoria.

En el primer capítulo se presenta la introducción del trabajo, donde se aborda el contexto y la justificación del proyecto, los objetivos tanto generales como específicos, el impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad, la planificación temporal de las tareas a desarrollar, y un resumen que incluye los productos obtenidos durante el proyecto.

El segundo capítulo aborda el estado del arte de los campos más relevantes dentro del ámbito del trabajo, que comprenden cinco áreas. En primer lugar, se enfoca en el sistema en la primera parte del proyecto, detallando información sobre Arduino, LoRa y los sensores. Después, el contenido se centra en el estudio en la segunda parte del proyecto, discutiendo sobre los conceptos y la actualidad de la agricultura, especialmente la agricultura regenerativa, y la aplicación de IoT en esta área. Este enfoque permite proporcionar al lector una base de conocimientos mínima sobre el contexto del proyecto.

El tercer capítulo se dedica a la primera parte del trabajo, es decir, al planteamiento formal del sistema, su diseño, componentes, etc. Se incluyen justificaciones de la solución adoptada y se detallan las diferentes etapas que conducen a la implementación del sistema final.

El cuarto capítulo se centra en la segunda parte del proyecto, es decir, en el estudio realizado. Se describe cómo se lleva a cabo este, su desarrollo y la interpretación de los datos obtenidos durante el mismo.

El quinto capítulo expone, representa, compara y comenta los resultados obtenidos a nivel global con el sistema implementado y el estudio realizado, lo que conduce a una conclusión final de los resultados y sus posibles consecuencias.

Finalmente, en el sexto capítulo se exploran las posibles líneas futuras para la utilización del sistema obtenido y las mejoras potenciales que podrían incorporarse en futuros desarrollos.

2. Estado del Arte

En este segundo capítulo se va a exponer un contenido que consiste en un repaso de las diferentes tecnologías, técnicas y proyectos relacionadas con el ámbito de este trabajo. Este capítulo se va a dividir en dos partes, en base al proyecto. La primera se enfoca en lo relativo al sistema de monitorización y la segunda al estudio.

2.1. Enfocado al Sistema

Este apartado se va a enfocar a hacer una investigación sobre el estado actual de las principales técnicas y tecnologías que se van a utilizar en el sistema del proyecto. Entre estas, destacan el uso de Arduino para el control, la tecnología LoRa y el uso de sensores para medir factores climáticos.

2.1.1. Arduino

El origen de la tecnología Arduino [1] lo encontramos en el año 2005. Se originó como un proyecto para estudiantes en el Instituto de Diseño de Interacción Ivrea (Italia). El objetivo era crear una herramienta sencilla y económica para el prototipado rápido dirigida a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación.



Figura 2. Logo Arduino

Las principales razones que impulsaron su desarrollo fueron el alto costo de las herramientas de desarrollo existentes en esos momentos (demasiado costosas para la mayoría de los estudiantes), y la complejidad de las plataformas de desarrollo existentes (demasiado complejas para los estudiantes sin experiencia en electrónica y programación).

Por tanto, se puede decir que Arduino es una plataforma de desarrollo electrónico de código abierto dirigida a facilitar el aprendizaje de electrónica y programación. Se compone de dos partes principales:

- Hardware: placas electrónicas con microcontroladores programables. Son relativamente económicas y fáciles de usar.
- Software: un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite escribir y subir código a las placas Arduino. El IDE de Arduino es fácil de aprender y usar, incluso para personas sin experiencia previa en programación.

Algunas de las principales características de Arduino que lo hacen un perfecto candidato al control del sistema del proyecto, junto a las ya comentadas, son:

- Bajo costo: Las placas Arduino son relativamente económicas.
- Facilidad de uso: El entorno de desarrollo de Arduino es fácil de aprender y usar, lo que la convierte en una plataforma accesible para usuarios principiantes y avanzados.
- Versatilidad: Arduino es conocido por su versatilidad, permitiendo la creación de una amplia variedad de proyectos desde simples hasta complejos.
- Comunidad: Arduino tiene una gran comunidad de usuarios que comparten información y proyectos.

Arduino se ha convertido en un pilar fundamental en la educación y el aprendizaje de la electrónica y la programación. Su enfoque en la simplicidad y la accesibilidad lo ha posicionado como una herramienta ideal para introducir a estudiantes de todas las edades en el mundo de la tecnología. Además, su integración con entornos de desarrollo como el IDE de Arduino facilita el proceso de programación, permitiendo a los usuarios concentrarse en la lógica del proyecto sin preocuparse por detalles técnicos complejos.

En el ámbito de la investigación y el desarrollo, Arduino ha sido ampliamente utilizado en la creación de prototipos y soluciones innovadoras en diversas áreas, como la automatización, el monitoreo ambiental, la robótica y el Internet de las cosas (IoT). Su capacidad para interactuar con una amplia variedad de sensores y actuadores lo convierte en una herramienta versátil para implementar sistemas inteligentes y conectados.

En el ámbito del desarrollo de proyectos, Arduino se destaca por su facilidad de uso, su flexibilidad y su amplia comunidad de usuarios que comparten conocimientos y experiencias. Los proyectos basados en Arduino abarcan desde dispositivos simples hasta complejas soluciones tecnológicas, demostrando su versatilidad y adaptabilidad a diferentes necesidades y contextos.

Entre las evoluciones existentes de Arduino se pueden encontrar: Arduino Uno (La primera placa Arduino comercial fue lanzada en 2005), Arduino Mega (con más pines y memoria), Arduino MKR (para aplicaciones IoT), etc.



Figura 3. Tipos de Arduino

Como se ha podido comprobar, esta tecnología tiene un amplio abanico de aplicaciones. En lo que respecta al campo en el que se sitúa este TFM, podemos encontrar el uso de Arduino para el monitoreo y sensado de diferentes variables ambientales [2]. En este contexto, podemos encontrar sistemas de comunicación inalámbrica diseñados para recopilar datos ambientales como temperatura y humedad en tiempo real y de manera remota, soportado por la plataforma Arduino Uno. El uso del entorno de desarrollo Arduino simplifica la implementación, brindando una solución versátil y accesible para diversas aplicaciones, y reduciendo significativamente el umbral de dificultad en el uso de la comunicación inalámbrica y la recopilación de datos ambientales.

En el mismo sentido, también se refleja la utilización de esta tecnología para el uso de sensores. Esta dinámica, es remarcablemente común en innumerables proyectos con Arduino, al destacar su compatibilidad con estos.

Se espera que la tecnología Arduino continúe creciendo en popularidad en los próximos años, y, además, que Arduino se utilice en una amplia gama de aplicaciones, desde la educación y el hobby hasta la electrónica profesional y el IoT.

2.1.2. LoRa

La tecnología LoRa (Long Range) [3] fue desarrollada por primera vez en 2009 por la empresa francesa Cycleo, que luego fue adquirida por Semtech en 2012.

Surgió como respuesta a la necesidad de una tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance, bajo consumo de energía y bajo costo para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT).



Figura 4. Logotipo de la tecnología LoRa

Las principales razones que impulsaron su desarrollo fueron las limitaciones de las tecnologías existentes. Las tecnologías inalámbricas tradicionales como Wi-Fi y Bluetooth no eran ideales para aplicaciones IoT a gran escala debido a su alcance limitado, alto consumo de energía y elevado costo. A esto habría que añadir que se preveía que IoT experimentara un crecimiento exponencial en los años venideros, lo que requería una tecnología de comunicación que pudiera soportar millones de dispositivos conectados.

Por tanto, la tecnología LoRa es una forma de comunicación inalámbrica de largo alcance que se ha vuelto fundamental en el ámbito de las redes de área amplia e IoT [R3]. Las características principales que ofrece son:

- Alcance: LoRa presenta una cobertura excepcional, permitiendo la comunicación a largas distancias, incluso en entornos urbanos densos.
- Eficiencia Energética: Es conocida por su eficiencia energética, lo que la hace ideal para dispositivos IoT que funcionan con baterías.
- Bajo costo: Los módulos LoRa son relativamente económicos, lo que los hace ideales para aplicaciones de bajo costo.
- Compatibilidad con el medio: La capacidad de penetrar obstáculos y funcionar bien en diferentes entornos, tanto interiores como exteriores, es una ventaja clave de LoRa.
- Capacidad de Conexión: Permite la conexión simultánea de miles de dispositivos en una red.

Estas características hacen que sea una tecnología muy útil en ciertos sectores. Algunas de las aplicaciones más interesantes en la actualidad son:

- En Agricultura Inteligente: En la agricultura, LoRa se utiliza para monitorear cultivos, condiciones climáticas y riego. De hecho, este punto coincide con el propósito del trabajo.
- En Ganadería Inteligente: En la ganadería, se utiliza para el monitoreo de los animales en grandes extensiones. Ayudando así, a facilitar la labor de los ganaderos.
- En Smart Cities: En entornos urbanos, LoRa se emplea para gestionar el tráfico, la iluminación pública y la recolección de residuos.
- En Industria: En aplicaciones industriales, LoRa se utiliza para el monitoreo remoto y la optimización de procesos.

Enfocándonos en el presente trabajo, la tecnología LoRa ha tenido un impacto significativo en la agricultura [4], revolucionando la forma en que se gestionan las operaciones agrícolas. Al integrar LoRa en sistemas de monitoreo agrícola, los agricultores pueden supervisar de manera remota y en tiempo real diversas variables críticas para el cultivo, como la humedad del suelo, la temperatura, la calidad del aire y la presión atmosférica. Esta capacidad de recopilar datos precisos y actualizados permite a los agricultores tomar decisiones basadas en información fehaciente para optimizar el rendimiento de sus cultivos, reducir costos y mejorar la eficiencia de sus operaciones.

Además, la tecnología LoRa facilita la implementación de prácticas agrícolas sostenibles al permitir un uso más eficiente de los recursos naturales, como el agua y los fertilizantes. Al monitorear de cerca las condiciones ambientales y del suelo, los agricultores pueden ajustar sus prácticas de riego y fertilización para garantizar un uso óptimo de estos recursos, reduciendo así el impacto ambiental y promoviendo la sostenibilidad a largo plazo.

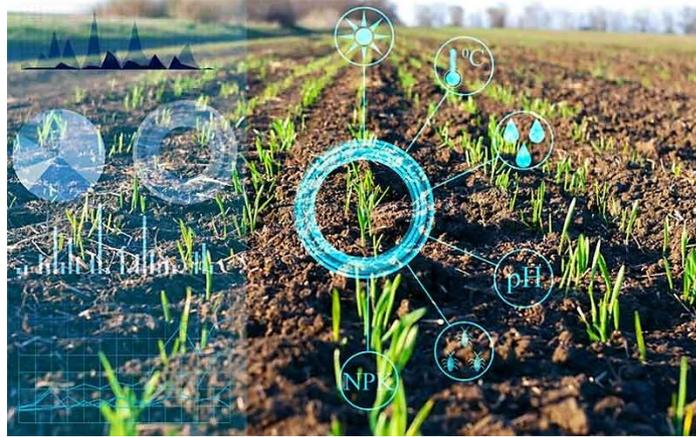


Figura 5. Tecnología LoRa en la Agricultura

Otro aspecto clave del impacto de LoRa en la agricultura es su uso junto a sensores LoRa distribuidos estratégicamente en el campo. Mediante estos, los agricultores pueden crear mapas detallados de variabilidad espacial en sus cultivos y aplicar tratamientos específicos en áreas específicas. En otras palabras, la tecnología LoRa ha impactado en la agricultura proporcionando a los agricultores herramientas avanzadas para monitorear, gestionar y optimizar sus operaciones. Su impacto en este sector se refleja en una mayor productividad, una gestión más eficiente de recursos y una mayor sostenibilidad ambiental.

Actualmente es posible encontrar una cantidad significativa de proyectos sobre la integración de LoRa en la agricultura [5], explorando soluciones de vanguardia para la agricultura inteligente y evaluando su potencial en distintas aplicaciones agrícolas. En particular, se examinan cuatro escenarios clave: sistemas de riego, monitoreo de plantaciones y cultivos, seguimiento de árboles y ganado, cada uno con requisitos diversos en términos de ancho de banda, densidad, complejidad de los sensores y consumo energético. Se destaca la relevancia de LoRa y su red LoRaWAN en estos contextos debido a su escalabilidad, eficiencia energética y bajo costo. Se discuten también futuras direcciones de investigación y desafíos abiertos. En este análisis, se enfatiza el uso de plataformas de desarrollo como Arduino para implementar

sistemas de riego basados en LoRa, lo que demuestra la versatilidad y accesibilidad de esta tecnología incluso en aplicaciones que requieren largos períodos de operación autónoma gracias a soluciones como generadores hidroeléctricos para la recolección de energía.

El futuro de LoRa parece prometedor, ya que esta tecnología de bajo consumo de energía y largo alcance se ha convertido en un pilar de IoT. Se espera una expansión de las redes LoRaWAN para una cobertura global y una mayor interoperabilidad, así como el desarrollo de dispositivos más pequeños y eficientes para diversas aplicaciones en áreas como ciudades inteligentes, agricultura, industria 4.0 y salud. Además, se anticipan innovaciones tecnológicas que mejorarán el rango, la tasa de datos, la seguridad y el posicionamiento, contribuyendo así a un impacto positivo en la eficiencia energética, la gestión del agua, la agricultura sostenible y la seguridad pública. LoRa tiene un futuro prometedor impulsando el crecimiento del IoT y mejorar la calidad de vida en los próximos años.

2.1.3. Sensores

Los sensores han desempeñado un papel fundamental en la evolución de la tecnología, desde sus orígenes [6] hasta su integración en dispositivos electrónicos modernos. Inicialmente, los sensores se remontan a épocas antiguas, donde instrumentos simples como termómetros de mercurio registraban magnitudes como la temperatura. Sin embargo, el primer sensor conectado de la historia data de 1874.



Figura 6. Sensores para Arduino

A lo largo del tiempo, los sensores han evolucionado significativamente, desde sensores piezorresistivos y capacitivos integrados en los años 80 hasta el desarrollo actual de sensores integrados aplicables en el ámbito industrial. Esta evolución ha llevado a la creación de sensores inteligentes que se interconectan con sistemas permitiendo un control más eficiente de procesos industriales.

La aplicación de la tecnología IoT en el sector agrícola mediante sensores es una constante [7]. Son ya muchos los proyectos en este sector que tienen esta base tecnológica, nacidos de varias recientes necesidades como la creciente demanda de producción agrícola en un mundo con una población en constante aumento. Esto ocasiona la necesidad de adoptar nuevas herramientas tecnológicas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la agricultura, especialmente mediante la implementación de la agricultura de precisión.

El uso de IoT en la agricultura, enfocándose en sistemas de control y automatización, monitoreo de variables físicas y optimización de recursos ya es una realidad que empieza a vislumbrarse. Es destacable su importancia para lograr un desarrollo agrícola sostenible, utilizando como principales actores a los diversos tipos de sensores existentes en la actualidad.

La referencia de esta información nos da un ejemplo (SGreenH-IoT) de los beneficios que se obtienen al implantar sistemas sensados de IoT en el sector agrícola como el acceso en tiempo real a las condiciones del cultivo y la reducción del uso de recursos a través de una aplicación precisa y oportuna.

En la actualidad, los sensores se encuentran en una amplia variedad de dispositivos y sistemas, facilitando la recopilación de datos y el control de procesos. Con el avance de IoT, se espera que para estos momentos se hayan superado los 50.000 millones de sensores recopilando datos [6].

2.2. Enfocado al Estudio

Este apartado se va a enfocar a hacer una investigación sobre el estado actual de los principales conceptos y/o contextos que se van a tratar en el Estudio del proyecto. Estos son la actualidad de la agricultura regenerativa y el uso de IoT en la agricultura.

2.2.1. Agricultura Regenerativa

El término *agricultura regenerativa* [8] tiene sus raíces en la década de los 80 y se originó a partir de investigaciones realizadas por *The Rodale Institute*.

En ese período, se comenzaron a explorar y publicar estudios sobre este enfoque agrícola que busca reconstruir la materia orgánica y la biodiversidad del suelo, contrarrestando así los efectos negativos generados por el modelo de agricultura industrial tradicional. Este concepto emergió como una alternativa sostenible y más respetuosa con el medio ambiente, enfocada en la regeneración del suelo y la promoción de una mayor salud de los ecosistemas agrícolas.

La agricultura regenerativa [8][9] es un enfoque agrícola sostenible que busca restaurar y mejorar la salud del suelo, promover la biodiversidad y reducir el impacto ambiental. En la actualidad, este modelo agrícola está ganando popularidad como una alternativa más respetuosa con el medio ambiente y más sostenible a largo plazo. Algunos aspectos clave de la agricultura regenerativa incluyen:

- Prácticas agrícolas sostenibles: La agricultura regenerativa integra diversas prácticas como la agricultura natural, orgánica, del carbono, agroforestería, entre otras, que buscan minimizar la intervención en el suelo y promover la salud de los ecosistemas.
- Beneficios ambientales: Este enfoque ayuda a prevenir la degradación del suelo [10], proteger la biodiversidad, mantener la fertilidad del suelo y mejorar el rendimiento de los cultivos. Además, contribuye a la captura de carbono atmosférico, lo que es crucial para mitigar el cambio climático.
- Certificaciones y formación: Existen certificaciones como el Regenerative Organic Certified (ROC) que garantizan altos estándares en prácticas regenerativas. Además, se ofrecen cursos y programas de formación para agricultores interesados en implementar este tipo de agricultura.

Por tanto, la agricultura regenerativa se presenta como una respuesta innovadora y necesaria para enfrentar los desafíos actuales de degradación del suelo, cambio climático y seguridad alimentaria. Su adopción está creciendo a nivel mundial como una forma más sostenible y responsable de producir alimentos.

En la actualidad [11], este enfoque se ha consolidado como una estrategia integral que busca restablecer y mejorar la salud del suelo, reviviendo los procesos biológicos y promoviendo la biodiversidad. Con un énfasis en la armonización con los ciclos naturales, la agricultura regenerativa no solo apunta a una producción sostenible, sino que también aborda la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático y otros riesgos

ambientales. A través de prácticas como la intensificación de los procesos biológicos, la diversificación de cultivos y la integración de sistemas, esta forma de agricultura no solo busca maximizar la productividad, sino también restaurar los ecosistemas agrícolas y mejorar la calidad de vida de los agricultores.



Figura 7. Olivar Regenerativo. Arahal (Sevilla)

Mirando hacia el futuro, la agricultura regenerativa se vislumbra como un pilar fundamental para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. Se espera que su adopción continúe creciendo a medida que más agricultores y empresas reconocen los beneficios a largo plazo que ofrece este enfoque. Además, con la creciente conciencia sobre la importancia de la conservación del suelo y la biodiversidad, se anticipa que la agricultura regenerativa se integrará aún más en las políticas agrícolas y en los sistemas de producción a nivel mundial. A medida que nos dirigimos hacia un futuro en el que la resiliencia y la sostenibilidad son requisitos fundamentales, la agricultura regenerativa ofrece una hoja de ruta prometedora para una producción agrícola más equitativa, saludable y en armonía con el medio ambiente.

2.2.2. IoT aplicado a la agricultura

El Internet de las Cosas (IoT) [13] es una red de objetos tales como sensores y actuadores conectados a Internet a través de redes fijas e inalámbricas donde pueden capturar datos de forma autónoma y auto-configurable de forma inteligente basada en hechos del mundo físico, permitiendo que estos sistemas se conviertan en participantes activos en diversos procesos públicos, comerciales, científicos y personales [R5].

Su aplicación en la agricultura ya es una realidad como se puede encontrar en distintos trabajos [R2][R4]. Ejemplo de estos, son investigaciones [12] respecto a cómo se maneja la información de los sensores, qué enfoque tienen las iniciativas (orientado al servicio, al cliente o a la plataforma) y cuáles son las plataformas de software más relevantes en la toma de decisiones agrícolas.

En este sentido, se concluye que IoT en la agricultura es esencial para la transformación digital del campo y puede atraer a las nuevas generaciones al sector rural, minimizando el éxodo rural. Se insta, por tanto, a la necesidad de continuar investigando las tecnologías más adecuadas para la implementación en la agricultura, como parte de la cuarta revolución industrial.

Otros trabajos existentes que se pueden encontrar en este ámbito [13] proponen la implementación de una arquitectura de agricultura de precisión respaldada por tecnologías de IoT y técnicas de minería de datos. Destaca de nuevo la importancia de la recopilación y análisis de datos en tiempo real para mejorar la eficiencia operativa en la industria agrícola. Esto último es una constante en todo este tipo de proyectos. Se mencionan diversas tecnologías utilizadas en la recopilación de datos, como sensores, GPS, redes inalámbricas y drones, así como la aplicación de IoT para la integración de estos dispositivos en la agricultura.



Figura 8. IoT en la agricultura

En relación con este proyecto, se pueden encontrar proyectos de IoT aplicado a la agricultura con el uso del protocolo LoRaWAN [14]. Como se puede ver, IoT es compatible con una gran cantidad de interesantes tecnologías como puede ser LoRa, lo que ofrece grandes oportunidades para realizar proyectos

tanto de investigación como de negocio. El enfoque a la agricultura de IoT es una gran apuesta para la modernización del campo como ya se ha podido comprobar en trabajos anteriores a este, pero que necesita seguir aún expandiéndose e investigando diferentes propuestas.

Entre los beneficios existentes [13], destaca la integración de hardware y software de bajo costo en la arquitectura, su flexibilidad y su funcionalidad para mejorar la productividad agrícola. Como se puede ver, IoT ofrece grandes oportunidades, incluso más allá de la agricultura, como en la educación, el marketing y en las ciudades inteligentes, donde la captura y análisis de datos en tiempo real también son fundamentales.

El futuro de la relación de IoT con la agricultura ya es una realidad que se vislumbra, y que se prevé siga en crecimiento debido los grandes beneficios que se obtienen como resultado.

3. Sistema del proyecto

El sistema del proyecto consiste en un bloque de sensado y transmisión de datos, por un lado, y, por otro, en un bloque cuya funcionalidad consista en la recepción y procesamiento de dichos datos. Su concepción es modular para facilitar tanto su implementación como su adaptación a las evoluciones que puedan surgir durante el proyecto.

3.1. Diseño

El primer paso a dar a la hora de diseñar es conocer qué necesita nuestro sistema para llevar a cabo su fin. Estos se han indicado ya en varios puntos de la memoria, por lo que se pueden agrupar en diferentes secciones los elementos que conforman parte del sistema y su correspondiente función dentro de este.

Una forma sencilla de mostrarlo es a través de un esquema visual como el que se muestra a continuación:



Figura 9. Esquema del Sistema Completo

De forma primaria, se distingue la división en bloques del sistema basado este en el origen/destino de los datos. Por tanto, por un lado, se tiene la parte o bloque del sistema dedicado al sensado y transmisión de datos (*Bloque de estaciones de medición*) y, por el otro, la parte o bloque del sistema dedicado a la recepción y procesamiento de datos (*Bloque base*). A partir de aquí, se sucederán nuevas

divisiones equivalente a un subsistema completo (*Estaciones*) y sus partes (*Módulos*). Todo esto se irá desgranando en las siguientes líneas.

3.1.1. Bloques

En esta sección se van a exponer las dos grandes partes en las que se divide el sistema y todas sus subdivisiones de forma detallada.

BLOQUE DE ESTACIONES DE MEDICIÓN

Engloba todas las estaciones de sensado del sistema.

3.1.1.1. Estaciones de Sensado

Se implementan dos de estas estaciones, tal y como se concibe en el proyecto. Una ubicada en una zona donde se haya arado la tierra para las mediciones del cultivo del olivar tradicional, y, otra, ubicada en una zona con vegetación silvestre que recree la situación del cultivo regenerativo.

Esta estación está compuesta por cuatro módulos, cada uno con una función concreta. De forma gráfica:



Figura 10. Esquema de una Estación de Sensado

A continuación, se describirán cada uno de los módulos que conforman las estaciones de sensado.

Módulos

Los módulos son las divisiones últimas de todo el sistema, y se dividen en funcionalidades concretas que formaran toda la estación. Estos se van a interconectar entre sí de forma cableada, estableciéndose para cada uno de ellos una zona dentro de una carcasa.

Para la carcasa va a utilizarse material reciclado compuesto por PET (tereftalato de polietileno), para que contenga el subsistema y actúe a modo de baliza. Todo esto se concreta en los siguientes puntos.

Módulo de Control

El módulo de Control tiene las funciones de leer los datos obtenidos por el sensor y enviarlos mediante el uso de la tecnología LoRa. El control del sistema se implementa mediante una placa Arduino NANO.

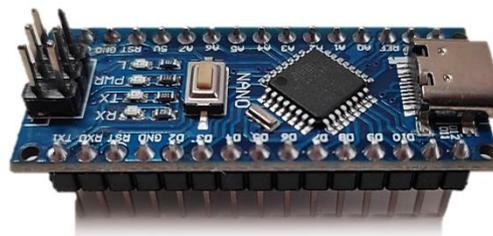


Figura 11. Microcontrolador. Arduino NANO

La conexión viene dada de la siguiente forma:

CONEXIONES ENTRE MODULOS

Modulo LoRa	Arduino NANO (Controlador)	Módulo Sensor			
1	NSS	D10	5V	Positivo (+)	1
2	MOSI	D11	GND	Negativo (-)	2
3	MISO	D12	<i>Sin conexión</i>	D0	3
4	SCK	D13	A0	A0	4
5	GND	GND			
6	VCC	3,3V			
7	DI02	D2			

En las especificaciones se indica que Arduino NANO tiene un convertidor ADC de 10 bits, es decir, que la resolución tiene unos valores entre 0 y 1023. El valor de 0V analógico es expresado en digital como B0000000000 (0) y el valor de 5V analógico es expresado en digital como B1111111111 (1023).

Por lo tanto, todo valor analógico intermedio es expresado con un valor entre 0 y 1023, es decir, sumo 1 en binario cada 4,883 mV.

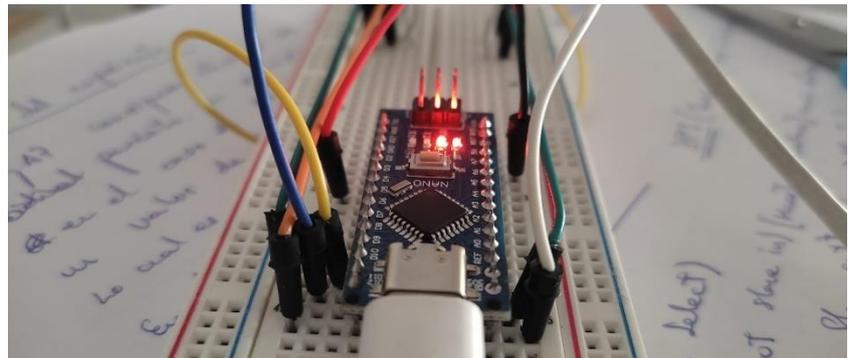


Figura 12. Subsistema implantado en la protoboard

La programación del microcontrolador se realiza por la propia interfaz de arduino IDE. Se adjunta en los *Anexos*, tanto información sobre Arduino NANO (datasheet) como los códigos programados en la realización del proyecto.

Módulo de transmisión LoRa

El módulo de transmisión LoRa será el encargado de transmitir los datos a la estación base. Esta transmisión a larga distancia se pretende llevar a cabo mediante el módulo LoRa SX1276 868Mhz loraTransceiver. En el caso de Europa, esta tecnología opera en el rango de frecuencia de los 868MHz.



Figura 13. Modulo SX1276 de LoRa para Arduino

Este módulo se conecta con el de control. La conexión viene dada de la siguiente forma:

Nº Pines	Arduino NANO (Controlador)	Modulo LoRa
1	D10	NSS
2	D11	MOSI
3	D12	MISO
4	D13	SCK
5	GND	GND
6	VCC	3,3V
7	DI02	D2

Este módulo se conecta con comunicación SPI mediante el uso de cables y tiene una tensión de alimentación de 3,3V. Se adjunta en los Anexos más información relativa a Modulo SX1276 de LoRa para Arduino.

Módulo de Sensado

El módulo de sensado se encarga de obtener los datos sobre la humedad del suelo. Para esta tarea se ha escogido el sensor de humedad FC-28 por sus características compatibles a las necesidades del subsistema.

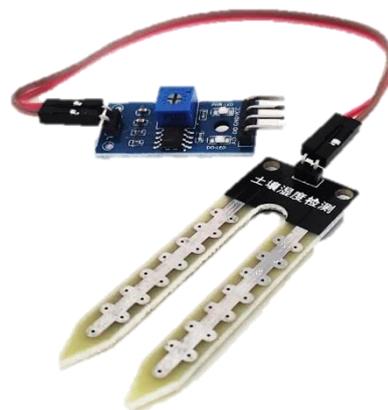


Figura 14. Sensor de humedad FC-28 para Arduino

En primer lugar, se conecta el sensor con el controlador. Para ello, se hace uso de cables. La conexión se hace tomando como referencia el

datasheet de este y el de Arduino NANO para la correcta implementación del sistema. La conexión de pines se muestra a continuación:

Nº Pines	Arduino NANO (Controlador)	Módulo Sensor
1	5V	Positivo (+)
2	GND	Negativo (-)
3	<i>Sin conexión</i>	D0
4	A0	A0

Como se puede observar en la tabla, la alimentación será de 5V a este módulo, aunque también puede alimentarse a 3,3V. Se toma esta decisión, en base a tener una tensión de referencia mayor en el CAD, ya que esta tensión coincide con la de alimentación.

Se adjunta en los *Anexos* más información relativa al sensor de humedad de suelo.

Módulo de Alimentación

La alimentación de las estaciones de medición que conforman el sistema se implementa mediante una pila de 9V recargable con una capacidad de 12800mAh, como la que se muestra en la imagen:



Figura 15. Batería para la alimentación de las estaciones de medición del sistema

La cantidad de baterías es de 3, dos para cada estación de medida y una de reserva. De esta forma, cuando alguna de las dos primeras se agote, se realizará el cambio por la tercera totalmente cargada. La batería extraída se cargará inmediatamente para el siguiente cambio y así sucesivamente.

Además de las pilas, se han adquirido sus correspondientes carcasas de cara a la implementación del sistema.

Encapsulado

Una parte fundamental es el encapsulado que albergará los distintos módulos de las estaciones de sensado del sistema. Hay que tener en cuenta que la electrónica se va a exponer a condiciones externas por lo hay que encontrar un encapsulado adecuado.

Siguiendo la línea que persigue este TFM, se ha decidido utilizar material reciclado para esta tarea. Es por ello, que se va a utilizar un envase de plástico como se muestra, a continuación:



Figura 16. Envase reciclado elegido para el encapsulado

Los motivos que han llevado a esta decisión son los que se exponen:

- **Material:** El envase está compuesto por polímero, que tiene una gran cantidad de características perfectas para el encapsulado. Destaca la gran durabilidad, impermeabilidad, resistencia, etc.
- **Adaptabilidad:** Este recipiente es fácil de adaptar a la necesidad del proyecto.
- **Forma:** Su forma alargada a modo de “torre cilíndrica” permite distribuir los distintos módulos en diferentes espacios.

- Reciclaje: Se trata de material reciclado al que se le da una nueva vida contribuyendo con el compromiso medioambiental del proyecto.
- Costo Cero: Al tratarse de material reciclado, no supone un coste al proyecto.

Evidentemente, se hará una tarea de adaptación del recipiente para albergar las diferentes partes del sistema como se muestra en la siguiente imagen:

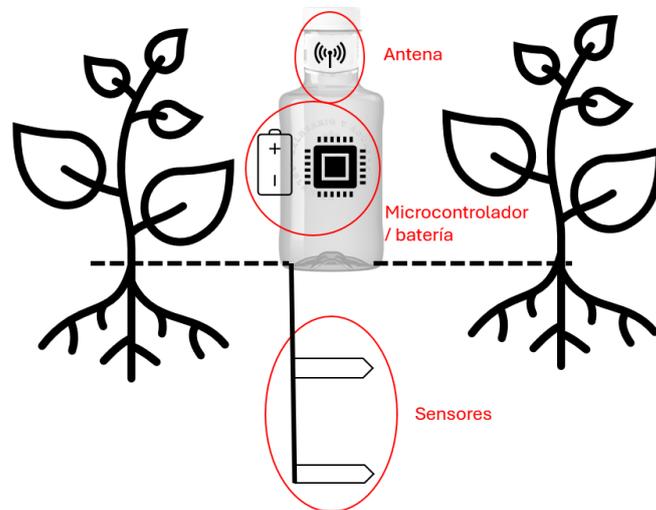


Figura 17. Planteamiento esquemático del encapsulado

Toda la adaptación de este encapsulado para el sistema se expondrá en el punto dedicado a la implementación.

BLOQUE BASE

Engloba la estación base del sistema.

3.1.1.2. Estación de Base

Se implementará una estación base, tal y como se concibe en el proyecto. Esta estación estará conectada a un terminal informático, en el cual se almacenarían los datos y, además, se obtendría la fuente de alimentación de esta parte del sistema.

Esta estación está compuesta por dos módulos, coincidentes con algunos de los vistos anteriormente, por lo que se expondrá, a continuación, la función concreta de cada uno de forma más resumida.



Figura 18. Esquema de la Estación base

Mencionar que, a diferencia de las estaciones de sensado, esta parte del sistema no necesita encapsulado ya que no se encontrará ante las situaciones climáticas adversas del exterior, si no que se va a situar junto al terminal informático en una zona interior del caserío que se sitúa entre el olivar.

Módulos

El bloque o estación base está compuesto por las siguientes partes:

Módulo de Control

El módulo de Control tiene la función de recibir, mediante el uso de la tecnología LoRa, los datos enviados por las estaciones de sensado. El control del sistema se implementa mediante una placa Arduino NANO.

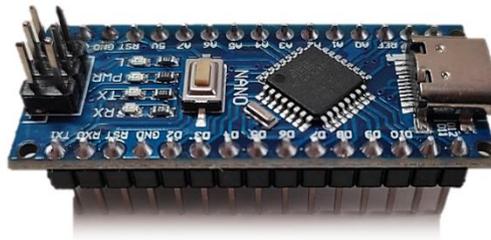


Figura 19. Microcontrolador. Arduino NANO.

La conexión viene dada de la siguiente forma:

CONEXIONES ENTRE MODULOS

Modulo LoRa	Arduino NANO (Controlador)	Módulo Sensor
1 NSS	D10	5V Positivo (+) 1
2 MOSI	D11	GND Negativo (-) 2
3 MISO	D12	Sin conexión D0 3
4 SCK	D13	A0 A0 4
5 GND	GND	
6 VCC	3,3V	
7 DI02	D2	

A diferencia de los otros casos, este módulo de control no necesitará alimentación externa de una batería. Esto se debe a que va a estar conectado todo el tiempo al terminar informático del que obtendrá la energía y al que irá transfiriendo los datos de las mediciones. Esto se implemente mediante un cable tipo C-USB.

Se adjunta en los *Anexos*, tanto la información sobre Arduino NANO (datasheet) como los códigos programados en la realización del proyecto.

Módulo de recepción LoRa

El módulo de recepción LoRa será el encargado de recibir los datos de las estaciones de sensado. Esta recepción se pretende llevar a cabo, de nuevo, mediante el uso del módulo LoRa SX1276 868Mhz loraTransceiver como el que se muestra en la imagen:



Figura 20. Modulo SX1276 de LoRa para Arduino

Este módulo se conecta con el de control. La conexión viene dada de la siguiente forma:

Nº Pines	Arduino NANO (Controlador)	Modulo LoRa
1	D10	NSS
2	D11	MOSI
3	D12	MISO
4	D13	SCK
5	GND	GND
6	VCC	3,3V
7	DI02	D2

Este módulo se conecta con comunicación SPI mediante el uso de cables y tiene una tensión de alimentación de 3,3V. Se adjunta en los Anexos más información relativa a Modulo SX1276 de LoRa para Arduino.

Equipo de trabajo

En referencia al equipo de trabajo puede usarse cualquier tipo de Terminal informático que sea compatible con Arduino IDE para poder realizar tanto la programación de los microcontroladores como utilizarlo para realizar el estudio. Además de que posea los puertos USB necesarios para la conexión con estos.

En este caso, se realizará mediante un ACER Vivabook que responde a las necesidades del proyecto adecuadamente.

3.1.1.3. Otros componentes

Además de los grandes elementos del sistema, se van a hacer uso de otros elementos no menos imprescindibles. Estos son algunos de estos componentes o elementos que también formarán parte del sistema:

- Protoboard: este elemento es fundamental a la hora de la realización de las pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de las partes del sistema. Además, se van a utilizar unas protoboard reducidas para la implementación del sistema de cara a que los elementos del proyecto puedan ser reutilizados para otros en el futuro, evitando así soldaduras innecesarias.
- Cables: son fundamentales para todas las interconexiones entre las partes del sistema. Entre los cables utilizados se encuentran los Dupont típicos para conexiones en la Protoboard cuya referencia es AWG26, es decir, que tienen una sección de 0,13mm².
- Resistencias: se van a utilizar como método de resolución de ciertos problemas de medida como se verá más adelante. Además de utilizarse junto a un led a modo de comprobador de corriente para comprobar las conexiones.

3.2. Implementación

Una implementación correcta del diseño del sistema es fundamental para que el proyecto tenga éxito. Es crucial el uso de toda la información disponible sobre los módulos (datasheet, especificaciones, etc.) para la correcta conexión entre módulos.

En las siguientes líneas se van a describir todos los pasos dados (planteamientos, análisis, cálculos, etc.) avenidos durante la implementación del sistema. Este periodo se ha dividido en varias fases para facilitar la comprensión al lector.

FASE INICIAL EN PLACA DE PRUEBAS

Tras definir todo el diseño y componentes del sistema podemos comenzar la implementación. El primer paso es obtener los componentes físicos del sistema que ya han sido mencionados en los puntos anteriores.

Una vez se obtiene el material, se comienza por comprobar el funcionamiento de los microcontroladores. Con el uso de protoboards se van conectando al terminal informático y, mediante el software Arduino IDE correctamente configurado, comprobamos que el funcionamiento es correcto.

Cabe mencionar que todas las pruebas realizadas enfocadas a comprobar características y especificaciones tienen un apartado propio dentro de esta memoria, por lo que no se profundizará en ellas en este capítulo. Las pruebas que se han tenido que realizar para conseguir un funcionamiento básico sí se expondrán en esta sección.

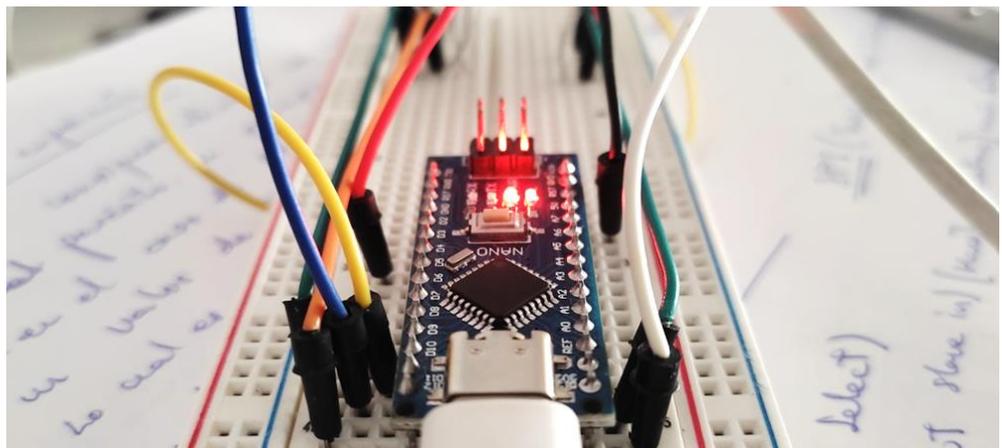
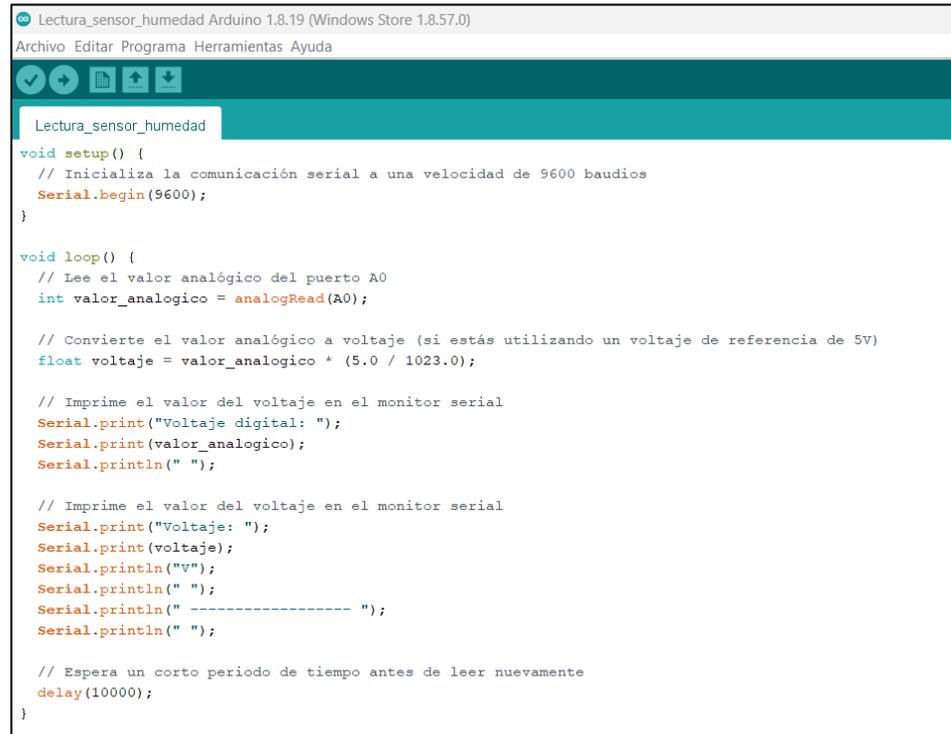


Figura 21. Microcontrolador implementado en la protoboard

Comprobado el correcto funcionamiento de estos, se procede a conectar uno de los sensores que se van a utilizar. Mediante el uso de la aplicación Arduino IDE, se programa la lectura de los datos obtenidos por la entrada analógica A0, donde se ha configurado el sensor.



```

Lectura_sensor_humedad
void setup() {
  // Inicializa la comunicación serial a una velocidad de 9600 baudios
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Lee el valor analógico del puerto A0
  int valor_analogico = analogRead(A0);

  // Convierte el valor analógico a voltaje (si estás utilizando un voltaje de referencia de 5V)
  float voltaje = valor_analogico * (5.0 / 1023.0);

  // Imprime el valor del voltaje en el monitor serial
  Serial.print("Voltaje digital: ");
  Serial.print(valor_analogico);
  Serial.println(" ");

  // Imprime el valor del voltaje en el monitor serial
  Serial.print("Voltaje: ");
  Serial.print(voltaje);
  Serial.println("v");
  Serial.println(" ");
  Serial.println(" ----- ");
  Serial.println(" ");

  // Espera un corto periodo de tiempo antes de leer nuevamente
  delay(10000);
}

```

Figura 22. Programa inicial para la lectura de Sensor

Sin llegar a realizar una prueba como tal, se ha comprobado que los puertos de entrada analógicos tienen una tensión parásita suficientemente alta como para perturbar las lecturas del sensor.

A partir de aquí, se ha procedido a investigar. Según indican una gran cantidad de usuarios de esta tecnología dentro de foros de debate, se debe a la conexión mediante USB de la placa al equipo informático. Por suerte, parece que este fenómeno no deseado, se corrige cuando el controlador es alimentado por una fuente externa y no mediante la conexión USB.

Sin embargo, existe una necesidad real de utilizar la placa con este conector ya que se necesitan hacer pruebas con la plataforma de trabajo. Para abordar la situación, se plantea el problema de forma teórica.

En la siguiente imagen, se muestra un esquema que representa la entrada analógica A0, que es la que se ha escogido como entrada de datos de la salida de tensión del sensor de humedad. Como se observa, se representa la interferencia sobre la carga interna de la puerta.

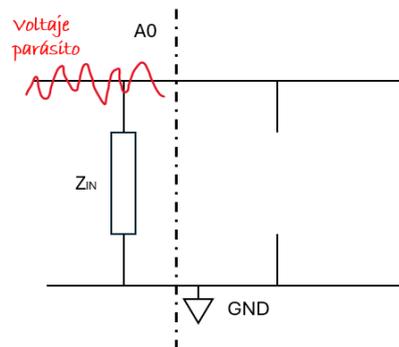


Figura 23. Voltaje parásito en las puertas analógicas

Mediante programación, se han leído que en todas las entradas analógicas la tensión parásita llega a alcanzar los 2.5V. Esto es un grave problema ya que nuestra tensión de referencia es de 5V, es decir, tenemos una interferencia en las puertas analógicas tal que supera la mitad de la tensión de referencia. Por este motivo, es crucial buscar la forma de eliminar este efecto indeseado.

La forma que se plantea es añadiendo una carga a la entrada. Esta resistencia, que denominaremos R , se añade para conseguir que se corrija este efecto. Aunque la lectura indica una tensión, en realidad no hay corriente que circule, por lo que al conectar la resistencia la entrada se estabiliza a cero. Esto es porque se comporta como un cortocircuito a tierra.

$$V_{A0} = I \cdot R \xrightarrow{I=0A} V_{A0} = 0V$$

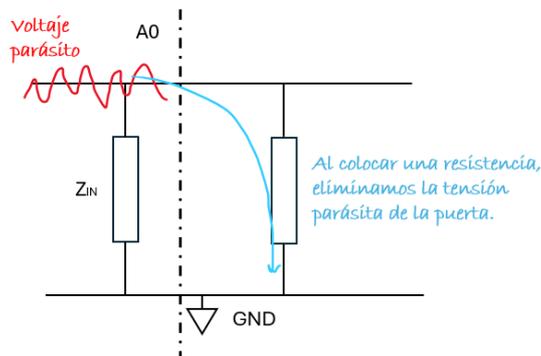


Figura 24. Cortocircuito al someter la resistencia a 0V

Con esta configuración se comprueba de nuevo, mediante la lectura de los datos de entrada, el valor en A0. Efectivamente, se comprueba que se ha conseguido estabilizar a cero la entrada. El valor de la resistencia utilizada ha sido de 10kΩ. Sin embargo, hay que realizar un estudio de su valor para escoger uno óptimo.

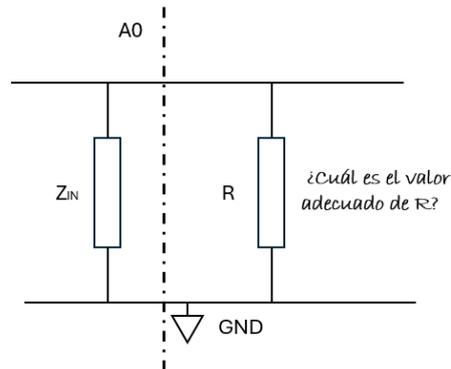


Figura 25. Valor de R

En principio, se puede pensar la siguiente suposición. La situación ideal sería que la resistencia fuese infinita, es decir, un circuito abierto. El problema es que la situación ideal es la que teníamos inicialmente, pero con el problema de la tensión parásita. Luego acercarnos a esta situación no ayudaría.

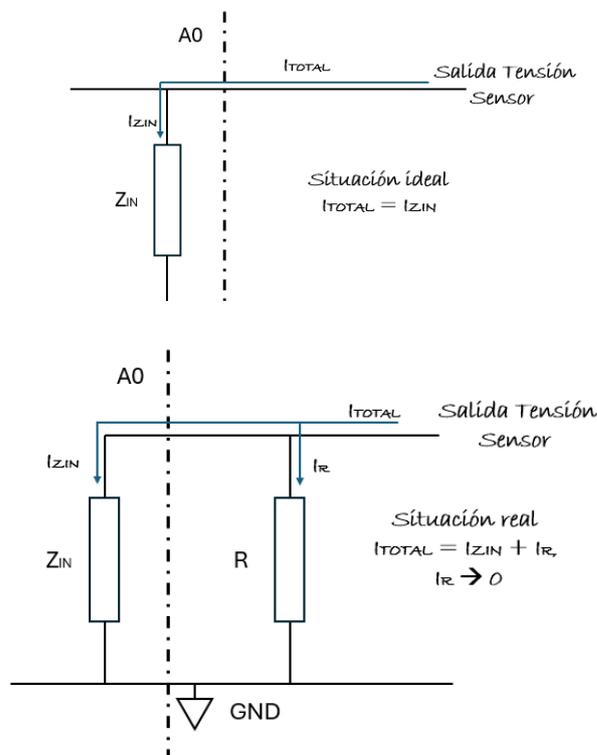


Figura 26. Similitud entre situación real e ideal

Por tanto, sólo nos queda enfocarlo de modo que nos alejemos de esa situación inicial, es decir, se debe tomar un valor de R menor a Z_{in} . Pero ¿Cuánto vale Z_{in} ? Realmente no se conoce, pero se puede calcular su valor para valores máximos de corriente y tensión si miramos las especificaciones.

$$Z_{IN} = \frac{V_{A0}(máx)}{I_{A0}(máx)} \rightarrow Z_{IN} = \frac{5V}{0,02A} = 250\Omega$$

Teniendo ese valor como una referencia, vamos a realizar una comprobación usando el propio microcontrolador para confirmar la suposición propuesta. Para ello, se va a colocar una resistencia de 220Ω en la entrada A0 y otra de $1M\Omega$ en la entrada A7. En cada una se conecta un sensor en diferentes situaciones. Lo que se muestra a continuación es el resultado de la prueba tras adaptar el código para esta:

Sin resistencias	Valor de A0: 192 Valor de A7: 193 Valores de tensión parásita
Con resistencias	Valor de A0: 0 Valor de A7: 0 Los valores de tensión parásita desaparecen
Con resistencias aplicando 5V en A7	Valor de A0: 0 Valor de A7: 1022 El valor ideal es 1023, aunque es un error asumible
Con resistencias aplicando 5V en A0	Valor de A0: 1023 Valor de A7: 346 Medida correcta A pesar de la R, los valores de tensión parásita vuelven a aparecer

Figura 27. Resultados de las pruebas con distintos valores de R. 220Ω en A0 y $1M\Omega$ en A7

Se comprueba mediante el programa que la resistencia de alta impedancia vuelve a tener interferencias (más bajas por supuesto). Por lo tanto, podemos confirmar que con las resistencias de bajas impedancias se mantiene el sistema estable. Esto no afecta a la medida ya que la lectura es de tensión que no varía por introducir una resistencia. Lo que varía es la corriente que cae en la impedancia de entrada, como se muestra a continuación:

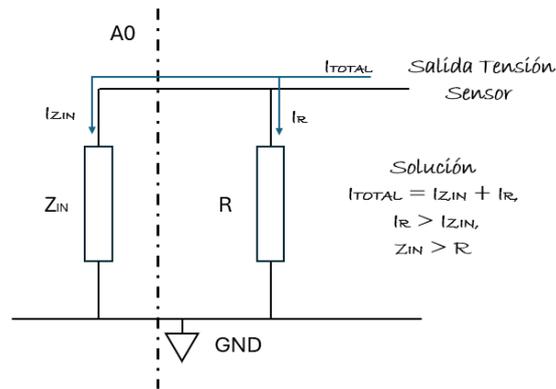


Figura 28. Solución al valor de R para el voltaje parásito

No obstante, hay que aclarar que lógicamente la introducción de cualquier elemento (sea activo o pasivo) en un circuito implica un coste energético. En este caso sería un coste en forma de calor, pero que es del todo asumible. Por tanto, tomaremos la resistencia de valor 220Ω.

Una vez solucionado el problema, se realizan las pertinentes pruebas de calibrado que se explicarán más adelante.

Tras esto, se procede a comprobar la funcionalidad de transmisión y recepción conectando un módulo LoRa a un microcontrolador para hacer las veces de transmisor y otro en otro microcontrolador para hacer el papel de receptor. Las conexiones entre estos módulos se realizan mediante cableado en dos protoboards, una para el transmisor y otra para el receptor. El conexasiónado sigue la comunicación SPI, como puede comprobarse en la imagen:

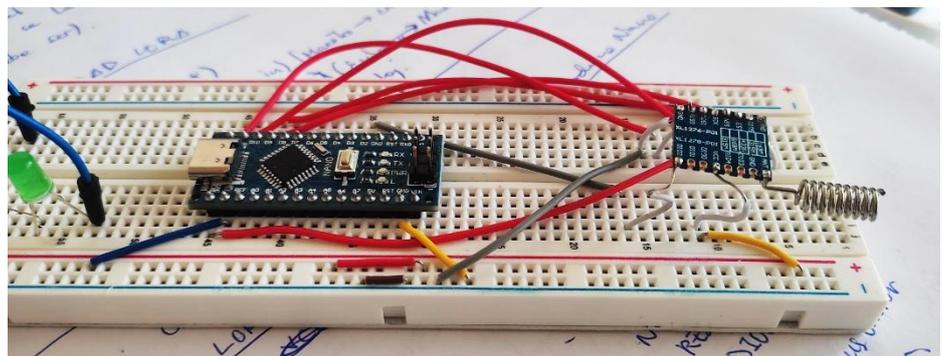


Figura 29. Módulo LoRa implementado con el microcontrolador en la placa de pruebas

Tras implementarlo en las placas de prueba, se pasa a la codificación en Arduino IDE para comprobar el correcto funcionamiento. Para ello, se realiza

un programa básico, conocido en todos los lenguajes como *Hola Mundo*, para transmitir un mensaje, y, otro, para recibirlo.

```

TX_HolaMundo Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
TX_HolaMundo
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Transmitter ready!");
}

void loop() {
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("Hola Mundo");
  LoRa.endPacket();

  Serial.println("Mensaje enviado: Hola Mundo");
  delay(15000); // Espera 2 segundos antes de enviar otro mensaje
}

```

```

RX_HolaMundo Arduino 1.8.19 (Windows Store 1.8.57.0)
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
RX_HolaMundo
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Receiver ready!");
}

void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    String receivedText = "";
    while (LoRa.available()) {
      receivedText += (char)LoRa.read();
    }

    Serial.print("Mensaje recibido: ");
    Serial.println(receivedText);
  }
}

```

Figura 30. Programa Hola Mundo de TX y RX en LoRa

Tras una serie de intentos en los que se ha ido corrigiendo tanto el código como la implementación física, se consigue transmitir el mensaje *Hola Mundo* y que se reciba por parte del receptor. Esto puede verse en la siguiente imagen donde comprobamos como se lee por pantalla los datos recibidos:

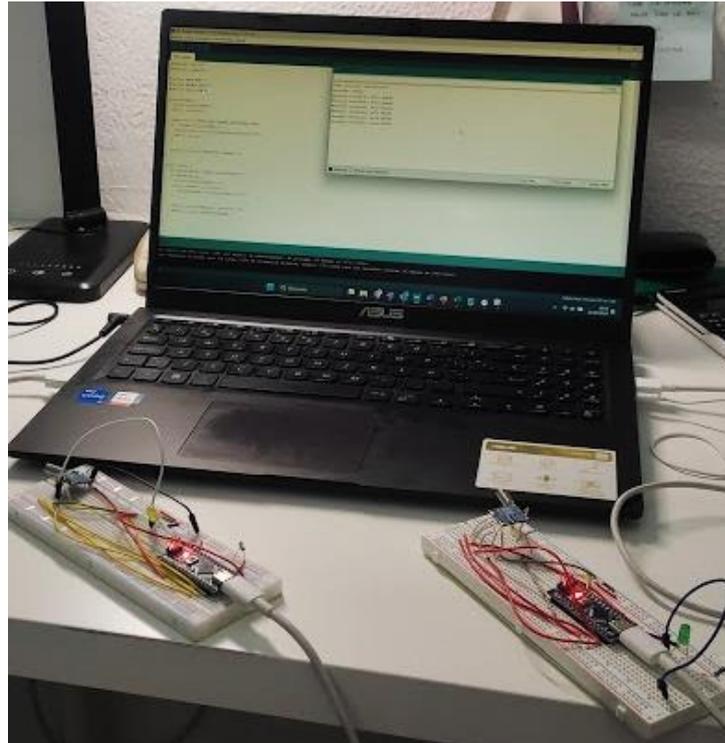


Figura 31. Prueba de Hola Mundo exitosa

Una vez conseguido que funcione esta parte del sistema, se realizan pruebas y se adaptará el código más adelante cuando se implemente los subsistemas de las estaciones para medir y transmitir los datos de la humedad.

En cuestión de módulos, solo nos queda revisar que la alimentación externa funcione correctamente. Esto se ha llevado a cabo de forma sencilla, ya que solo ha habido que conectar el microcontrolador del TX a esta fuente de alimentación, y comprobar que en efecto se seguían recibiendo correctamente los mensajes de *Hola Mundo*.

En lo que se refiere a la alimentación, que es una parte crucial del sistema, se ha comprobado que la recarga de la pila dura aproximadamente una hora. En cuanto a la duración de la batería para el consumo del sistema es difícil de discernir ya que en esto intervienen varios factores, como la temperatura,

la carga, la edad de la batería, etc. Es por ello, que quizás la forma más sencilla de obtener la duración aproximada es con la propia experiencia al implantar el sistema.

No obstante, se ha calculado a continuación una posible duración teórica con valores aproximados a la realidad, que, si bien no resultará exacto, sí nos da una información de carácter orientativo.

Primero, debemos definir cuando se van a realizar las mediciones. La idea es que se realicen tres mediciones al día. Estas son:

- **Medida de las 00:00h:** tras finalizar la Jornada diurna.
- **Medida de las 08:00h:** tras finalizar la Jornada nocturna.
- **Medida de las 16:00h:** Mediodía. Hora de mayor incisión solar.

Teniendo en cuenta esto, pasamos a realizar suposiciones que se acerquen a la realidad para realizar los calculos. En cuestiones de consumo, tenemos que durante las mediciones:

Arduino NANO	Sensores		TX LoRa
40 mA	30 mA	30 mA	100 mA

Este consumo aproximado se daría en el periodo de una medida que supondremos que tiene una duración de 1 minuto. Por tanto, este consumo se dará durante 3 minutos al día (tres medidas). El resto del tiempo, en el que el sistema estará en reposo o modo espera se supone el siguiente consumo:

Arduino NANO	TX LoRa
20 mA	10 mA

Por tanto, y en términos de hora, tenemos que el subsistema o estación mide durante 0,05h consumiendo un total de 200mA y está en espera durante 23,95h consumiendo un total de 30mA. Por tanto, tenemos que:

$$\text{En espera} \rightarrow \text{Consumo} = 30\text{mA} \cdot 23,95\text{h/día} = 718,5\text{mAh/día}$$

$$\text{En medición} \rightarrow \text{Consumo} = 200\text{mA} \cdot 0,05\text{h} = 10\text{mAh/día}$$

$$\text{Consumo Total} = \frac{728,5\text{mAh}}{\text{día}} \cdot \frac{1\text{día}}{24\text{h}} = 30,35\text{mA}$$

Finalmente obtenemos una duración teórica orientativa de la duración de la pila:

$$\text{Duración} = \frac{12800mAh}{30,35mA} = 421,74h \approx 18 \text{ días.}$$

Con el estudio comprobaremos si nos acercamos a esta duración, aunque como se reitera, depende de muchos factores ajenos como la temperatura. Es por ello que se intentará que afecte lo menos posible haciendo uso de un buen encapsulado de toda la circuitería.

FASE DE ADAPTACIÓN DEL ENCAPSULADO

Comprobado que todo funciona correctamente según lo previsto, pasamos a enfocarnos a una parte fundamental en el bloque de las estaciones de medida, el encapsulado. Como se ha adelantado en puntos anteriores, se va a llevar a cabo haciendo uso de material reciclado. En concreto una botella de agua cuyo material es PET (o plástico de forma coloquial).

Evidentemente, este recipiente debe adaptarse para poder albergar el subsistema adecuadamente. Para ello, vamos a realizar una serie de modificaciones teniendo en cuenta el entorno en el que estará situado.

Se muestra a continuación una imagen ilustrativa de la transformación que se pretende hacer al recipiente, y los motivos que han llevado a ello:



Figura 32. Transformación del envase para las diferentes situaciones

Utilizando la imagen a modo de guía, lo primero que se va a realizar en el recipiente es una serie de orificios en disposición de malla, de modo que el aire del interior se renueve constantemente para enfriar el interior. Estos orificios, serán pequeños de modo que no permita la entrada de insectos ni de agua (como se puede ver en la segunda ilustración). Además, estos serán distribuidos teniendo en cuenta el comportamiento del aire de modo que en la parte superior pueda escapar el aire caliente y en la zona baja pueda entrar el aire frío.

Otro punto a tener en cuenta es intentar reducir el calor generado por la exposición de la estación de sensado al sol. Para ello, se va a revestir todo el conjunto de color blanco que refleja mayor cantidad de luz y, por tanto, absorbe menos calor. La forma de hacerlo ha sido aplicando una capa de imprimación en primer lugar, seguido de un pintado de color plata. Esto se hace así para facilitar el revestimiento de blanco. Hay que indicar que todo se realiza con pintura espray que facilita mucho esta tarea.

Tras la primera mano de pintura, vamos a proceder a realizar las transformaciones comentadas anteriormente, para posteriormente volver a dar otra mano de pintura. Además de esto, hay que tener en cuenta que se van a instalar las carcasas de las baterías en la parte externa del encapsulado. Esto es así para facilitar el recambio de batería.



Figura 33. Fase inicial de la adaptación del envase

Las carcasas de las baterías también son de plástico, por lo que protegerán adecuadamente a las baterías de las inclemencias externas.

Aclarados estos puntos, se procede a realizar los agujeros de ventilación y a seccionar las botellas por la parte inferior dejando una parte sin cortar. Esto se hace para poder introducir los módulos del subsistema.



Figura 34. Apertura del encapsulado para la introducción del subsistema

Hecho esto, colocamos las carcasas de la alimentación en el exterior e introducimos el cableado en el interior mediante un orificio. Más tarde, mediante el uso de siloxano nos aseguramos de que no existan partes susceptibles al agua.

El resultado es el que se muestra:



Figura 35. Encapsulado complementado con las carcasas de las baterías

Finalmente, aplicamos varias manos de pintura blanca hasta que todo quede uniforme. Tras esto, aplicamos una mano de barniz en aerosol para que las capas de pinturas queden consistentes.

El resultado final es el que se puede ver a continuación:



Figura 36. Resultado final del encapsulado

Comentar que, en este caso, se han tenido en cuenta las especificaciones y necesidades comentadas. Otra posibilidad, en caso de querer camuflar la presencia de las estaciones de sensado en el olivar, habría sido pintar con colores de camuflaje el encapsulado. Con esto se quiere decir, que esta fase tiene bastantes opciones y oportunidades que ofrecer de cara a otras necesidades o proyectos.

FASE DE ENCAPSULADO DEL SUBSISTEMA

Llegar a esta fase significa haber comprobado el correcto funcionamiento de los dos subsistemas o hardware de las estaciones de sensado y, además, que ha finalizado con éxito la puesta a punto del encapsulado.

Lo primero que vamos a hacer en esta situación es montar todos los módulos de la misma forma en una protoboard más pequeña, concretamente con estas dimensiones: 82 x 55 x 8,5 mm. Esta protoboard tiene un tamaño adecuado para introducirla dentro del encapsulado. En este punto cabe aclarar que la intención en todo momento del proyecto es facilitar la

reutilización de los módulos para posibles modificaciones futuras del actual proyecto o para otros proyectos, contribuyendo así al compromiso con la agenda 2030. De esta forma también se facilita la reparación, sustitución o revisión de cualquier parte en caso de detectarse algún fallo.

Realizado este paso, se va a utilizar una varilla de aluminio de 20cm para colocar los sensores y ayudar así a colocarlos correctamente a las profundidades estipuladas como puede verse en la siguiente imagen:

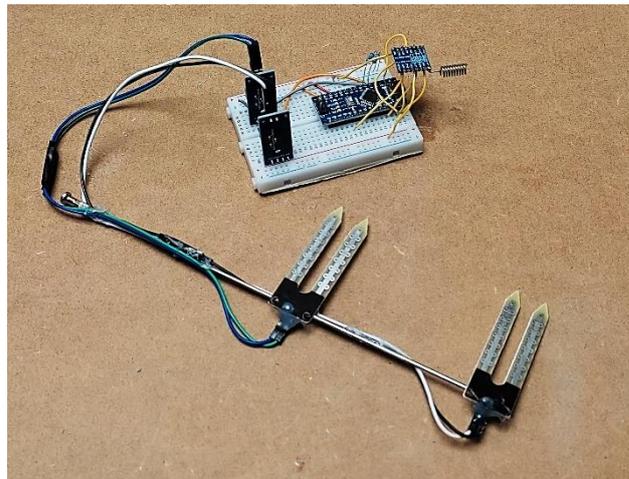


Figura 37. Subsistema o hardware de las estaciones de sensado

Como se puede apreciar, los sensores irán a 10 y 20 cms de profundidad. Durante la implementación se utilizó siloxano (material impermeable y aislante) para sellar las conexiones eléctricas y realizar la sujeción de los sensores. Cabe señalar, que los sensores se disponen de forma vertical para evitar acumulación de agua en su superficie, corrompiendo los datos reales.

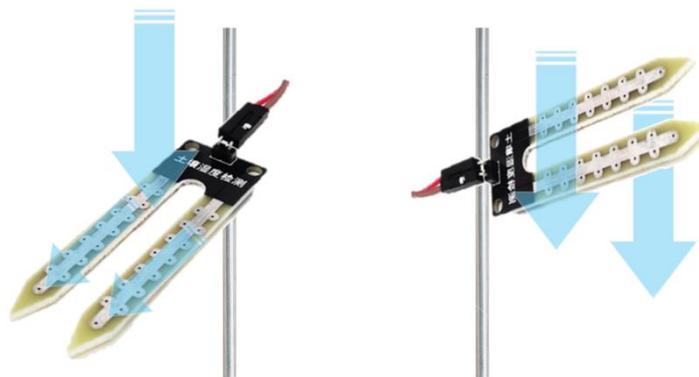


Figura 38. Explicación de la orientación de los sensores dentro del suelo

Como se puede comprobar, nada en sistema debe dejarse al azar. Todo debe estudiarse con precisión para que funcione de la forma estipulada.

Aclarada esta parte, procedemos a introducir, por la sección realizada anteriormente, el hardware de la estación de sensado. El tamaño de la protoboard y las placas de conexión de los sensores que están colocadas perpendicularmente a esta, como puede verse en la Figura X, encajan perfectamente con el diámetro del encapsulado. Además, al estar tan justo y pesar prácticamente unos pocos gramos, los elementos interiores hacen las veces de sujeción. Esto facilita su revisión en caso de que hiciera falta, y nos ahorra hacer uso de adhesivos.

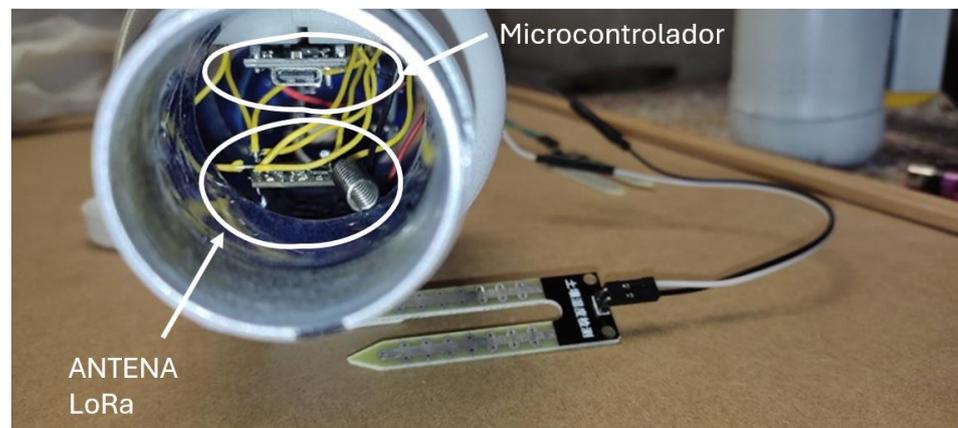


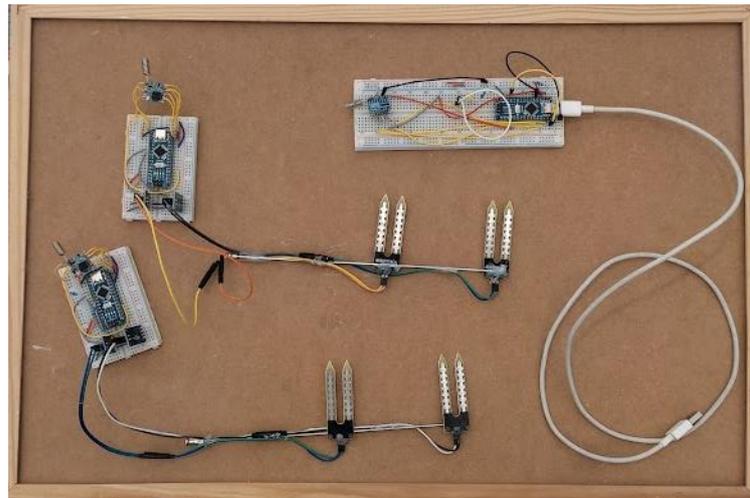
Figura 39. Subsistema dentro del encapsulado

Una vez introducido, sólo nos queda volver a comprobar que todo sigue estando correcto realizando de nuevas comprobaciones. Mencionar que una de las ventajas del encapsulado, es que podemos seguir configurando el microcontrolador en caso de necesitarlo ya que el conector C es fácilmente accesible, como puede apreciarse en la imagen anterior.

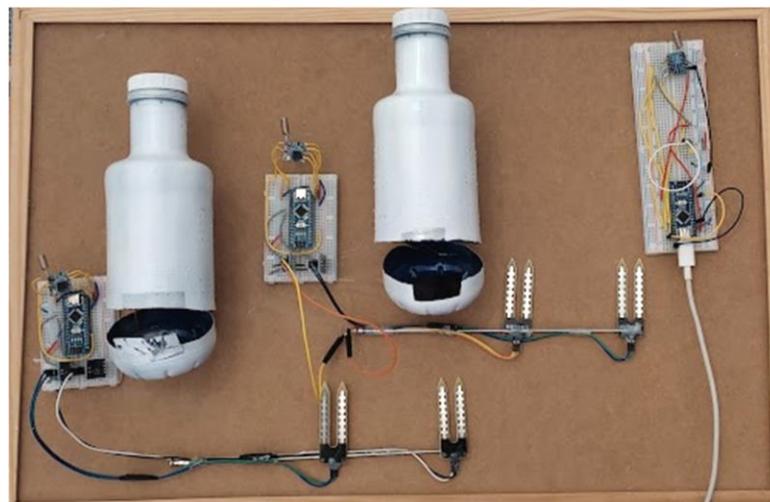
Finalmente, verificado el comportamiento, se procede a realizar una abertura en la parte inferior del recipiente para el paso de los cables de los sensores y, posteriormente, se sella con siloxano u/o adhesivos las aberturas de forma que el encapsulado quede finalmente hecho una pieza.

El resultado final es el que puede contemplarse en la última imagen de la siguiente página, junto a la configuración física final del hardware.

HARDWARE DEL SISTEMA



HARDWARE DEL SISTEMA Y ENCAPSULADO



ESTACIONES DEL SISTEMA. ENCAPSULADO.



Figura 40. Sistema desgranado.

FASE DE IMPLANTACIÓN TOTAL DEL SISTEMA

Nos encontramos en la fase final en lo que al sistema se refiere. Evidentemente, durante el estudio se realizará una fase de seguimiento para observar su funcionamiento, pero esta información formará parte ya de los resultados del proyecto.

Con respecto a esta fase, a sufrido un retraso de aproximadamente dos semanas, ya que en la fase de pruebas la antena de la estación TX2 dejó de operar. En ese momento, se volvió a adquirir una nueva, pero la falta de stock ha provocado la demora indicada. Por tanto, la instalación final se culminó el viernes 24 de marzo, tomando el 25 y 26 como días de pruebas.



Figura 41. Estación de medida TX1 instalada.

La instalación ha comenzado por designar las ubicaciones de cada estación dentro del terreno donde se va a llevar a cabo el estudio. Esta zona se corresponde con una finca privada que nos ha permitido la instalación del sistema. El área de suelo regenerativo donde se habilitará una de las estaciones es de unos 20m² situados en la zona limítrofe de las tierras, donde no se ha practicado el arado.

Las estaciones estarán dispuestas como se muestra en la siguiente imagen. La estación I (TX1), corresponderá a la zona de agricultura tradicional y la estación II (TX2) corresponderá a la zona con suelo regenerativo. Las estaciones de sensado estarán a 68 y 78 metros, respectivamente, de la estación base (RX). La estación base estará situada en una sala de la vivienda rural que se encuentra en el terreno, para la recolección de datos.

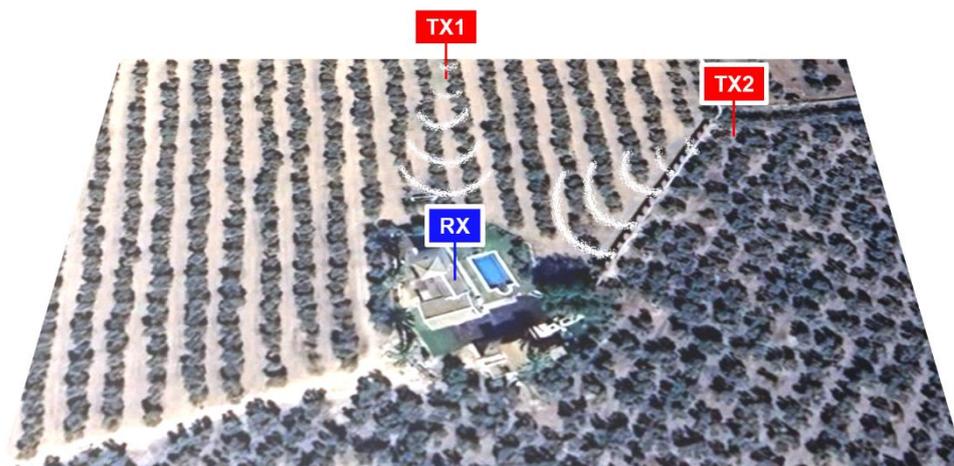


Figura 42. Plano del olivar del estudio.

En dichas ubicaciones se situarán las estaciones de medición. La instalación de estas es sencilla. Una vez elegido el lugar exacto, se realiza una pequeña excavación en la tierra de algo más de 20 cm (profundidad máxima del módulo de sensado) y con suficiente amplitud. Esta tarea se ha realizado con una zoleta como se muestra en la imagen. La elección del posicionamiento se realizó de modo que para ambas estaciones el olivo más próximo se sitúe a unos 2-3 metros. Con esto se consigue, por un lado, igualar las condiciones de ambas estaciones y, por otro, evitar dañar alguna raíz de este.



Figura 43. Instalación de estaciones en el olivar.

Una vez realizado esto, se introduce la estructura de sensores en el interior y se rellena con tierra. De esta forma, conseguimos también la sujeción de la estación.

Dada la situación de sequía, el estado de la tierra es bastante seco y es conveniente que los sensores queden bien abrigados por la tierra. Por tanto, una vez enterrados los sensores se ha echado un poco de agua para que la tierra se humedezca y compacte. Tras unas horas, se ha vuelto a apretar la tierra y nos aseguramos así de que los sensores quedan bien abrigados en el subsuelo.

Esta tarea se ha realizado el día 24 de mayo. El echar un poco de agua también ayuda a comprobar que el sistema sigue funcionando correctamente, como se comentará más adelante, en la prueba de funcionamiento de la instalación.

La estación base, o de recepción, se sitúa en el caserío que se aprecia en el mapa anterior donde se ha habilitado una zona para esta tarea. En la imagen se puede apreciar como se reciben los datos en el terminal, que quedan registrados en el monitor serial. Posteriormente, son pasados y ordenados en la tabla de resultados para su posterior análisis.

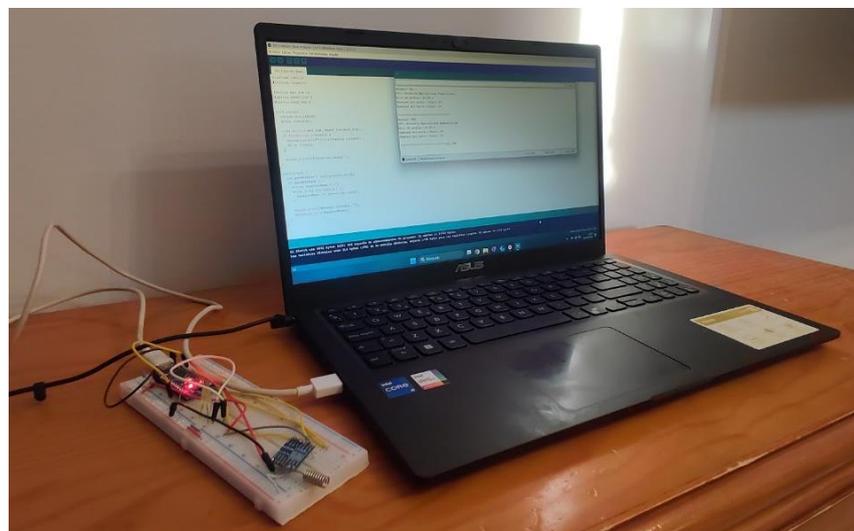


Figura 44. Estación base instalada en una sala del caserío.

En la siguiente imagen, se muestra una captura en el que se aprecia como se muestra la información por el monitor serial:

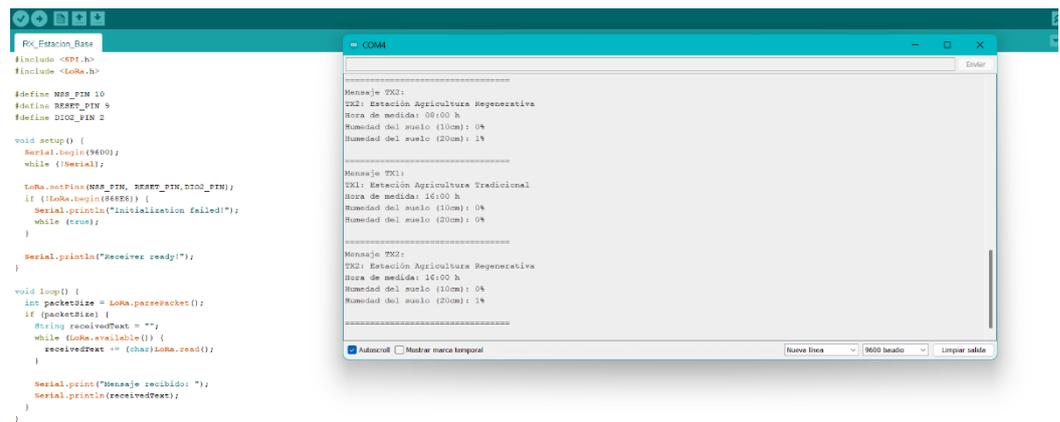


Figura 45. Lectura de datos del estudio.

Finalmente, nos enfocamos en la parte software del sistema, parte primordial de este. Todos los códigos están escritos en C++ al estar basado el sistema en arduino. Mencionar que, aunque el código del sistema se incluye en el apartado *Anexos*, se pasa en las siguientes líneas a explicar de forma concisa para facilitar su comprensión:

- **CODIGO ESTACIÓN BASE**

Este código configura un dispositivo Arduino para recibir mensajes a través de un módulo LoRa, lee estos mensajes y los muestra en el monitor serie.

El programa incluye dos bibliotecas esenciales: La biblioteca *SPI.h* que es necesaria para la comunicación SPI (protocolo de comunicación utilizado por el módulo LoRa); y, la biblioteca *LoRa.h* que proporciona las funciones específicas para interactuar con el módulo LoRa. Tras estos son definidos los pines utilizados.

```

RX_Estacion_Base
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2
    
```

Figura 46. Código EB parte 1.

La función *setup()* inicia la comunicación serie con una velocidad de 9600 baudios, lo cual permite que el Arduino se comunique con el terminal informático para enviar mensajes de diagnóstico y recibir comandos. El

comando `while (!Serial);` asegura que la conexión serie esté establecida antes de continuar con la ejecución del programa.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Receiver ready!");
}
```

Figura 47. Código EB parte 2.

Se configuran los pines del módulo LoRa utilizando la función `LoRa.setPins()`. Luego, se intenta iniciar el módulo LoRa con la frecuencia de 868 MHz mediante `LoRa.begin(868E6)`. Esta frecuencia es la utilizada en Europa para comunicaciones LoRa. Si la inicialización falla, se imprime “*Initialization failed!*” en el monitor serie y el programa entra en un bucle infinito para detener su ejecución. Si la inicialización tiene éxito, se imprime “*Receiver ready!*” indicando que el dispositivo está listo para recibir mensajes.

```
void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    String receivedText = "";
    while (LoRa.available()) {
      receivedText += (char)LoRa.read();
    }

    Serial.println(receivedText);
  }
}
```

Figura 48. Código EB parte 3.

La función `loop()` se ejecuta repetidamente mientras el Arduino está encendido. En esta función, se verifica si hay un paquete de datos disponible para leer con `LoRa.parsePacket()`. Si hay un paquete, se procede a leerlo. Se inicializa una cadena de texto `receivedText` vacía y se va llenando con los

caracteres recibidos del módulo LoRa mediante un bucle *while* (*LoRa.available()*) que lee cada byte de datos disponible.

Finalmente, el mensaje recibido se imprime en el monitor serie. Esto permite que cualquier mensaje enviado al módulo LoRa sea visible en la pantalla del ordenador conectada al Arduino.

- **CODIGO ESTACIÓN MEDICIÓN**

Los códigos de las estaciones de medición son iguales, salvo que en cada uno se indica a qué estación corresponde, TX1 o TX2. Por tanto, se va a analizar el código de uno de ellos, por ejemplo, de TX1.

Este código mide la humedad del suelo en dos profundidades diferentes, transmite estos datos a través de LoRa, y luego entra en modo de bajo consumo para conservar energía hasta la próxima medición, que se realiza cada 8 horas.

El programa comienza incluyendo las bibliotecas necesarias: *SPI.h* para la comunicación SPI, *LoRa.h* para manejar el módulo LoRa, y *avr/sleep.h* y *avr/power.h* para gestionar el modo de bajo consumo del microcontrolador.

Se definen los pines para el módulo LoRa y los pines analógicos utilizados por los sensores de humedad del suelo, y una constante *TIEMPO_SLEEP* que representa el tiempo de espera en modo sleep (8 horas en milisegundos). Además, se declara una variable global *contador_medidas* para llevar la cuenta de las horas de las mediciones realizadas.

```

TX1_Codigo_Final
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <avr/power.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2

// Define los pines analógicos utilizados por los sensores
#define PIN_SENSOR_A1 A1
#define PIN_SENSOR_A2 A2

// Define el tiempo en milisegundos para 8 horas
#define TIEMPO_SLEEP 28800000 // 8 horas en milisegundos

int contador_medidas = 0;

```

Figura 49. Código TX1 parte 1.

En la función `setup()`, encontramos que el código es prácticamente igual al de la estación base, solo indicando que está listo para transmitir en caso de iniciación correcta.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Transmitter ready!");
}
```

Figura 50. Código TX1 parte 2.

En la función `loop()`, que se ejecuta repetidamente mientras el Arduino está encendido, se realiza la medición de la humedad del suelo y luego el dispositivo entra en modo sleep hasta la próxima medición.

```
void loop() {
  // Realiza la medición
  realizarMedicion();

  // Entra en modo de bajo consumo y espera hasta la próxima medición
  entrarEnModoSleep();
}
```

Figura 51. Código TX1 parte 3.

La función `realizarMedicion()` se encarga de:

1. Leer los valores analógicos de los sensores de humedad del suelo a 10 cm y 20 cm de profundidad.
2. Calcular los porcentajes de humedad a partir de estos valores utilizando la función `calcularPorcentaje()`.
3. Determinar la hora de la medición basada en el contador de mediciones.
4. Incrementar el contador de mediciones.
5. Enviar los datos de la medición a través del módulo LoRa.
6. Imprimir el mensaje enviado en el monitor serie.

La función *calcularPorcentaje(int valor_analogico)* convierte los valores analógicos leídos en porcentajes de humedad, utilizando una función de mapeo que convierte un rango de valores de sensor en un rango de porcentajes de 0 a 100%.

```

void realizarMedicion() {
  // Lee el valor analógico del sensor de humedad del suelo a 10 cm de profundidad
  int valor_analogico_A1 = analogRead(PIN_SENSOR_A1);

  // Lee el valor analógico del sensor de humedad del suelo a 20 cm de profundidad
  int valor_analogico_A2 = analogRead(PIN_SENSOR_A2);

  // Calcula los porcentajes para cada sensor
  int porcentaje_A1 = calcularPorcentaje(valor_analogico_A1);
  int porcentaje_A2 = calcularPorcentaje(valor_analogico_A2);

  // Determina la hora de medida basada en el contador
  String hora_medida;
  if (contador_medidas % 3 == 0) {
    hora_medida = "08:00";
  } else if (contador_medidas % 3 == 1) {
    hora_medida = "16:00";
  } else {
    hora_medida = "00:00";
  }

  contador_medidas++;

  // Envía los datos por LoRa
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("TX1: Estación Agricultura Tradicional\n");
  LoRa.print("Hora de medida: ");
  LoRa.print(hora_medida);
  LoRa.print(" h\nHumedad del suelo (10cm): ");
  LoRa.print(porcentaje_A1);
  LoRa.print("%\nHumedad del suelo (20cm): ");
  LoRa.print(porcentaje_A2);
  LoRa.print("%");
  LoRa.endPacket();

  // Imprime el mensaje enviado por LoRa en el monitor serial
  Serial.print("Mensaje enviado por LoRa:\nTX1: Estación Agricultura Tradicional\n");
  Serial.print("Hora de medida: ");
  Serial.print(hora_medida);
  Serial.print(" h\nHumedad del suelo (10cm): ");
  Serial.print(porcentaje_A1);
  Serial.print("%\nHumedad del suelo (20cm): ");
  Serial.print(porcentaje_A2);
  Serial.println("%");
}

```

Figura 52. Código TX1 parte 4.

```
int calcularPorcentaje(int valor_analogico) {
    int porcentaje;

    if (valor_analogico >= 1013) {
        porcentaje = 0;
    } else if (valor_analogico <= 220) {
        porcentaje = 100;
    } else {
        porcentaje = map(valor_analogico, 213, 1020, 100, 0);
    }

    return porcentaje;
}
```

Figura 53. Código TX1 parte 5.

Finalmente, la función *entrarEnModoSleep()*:

1. Configura el microcontrolador para entrar en modo de bajo consumo *SLEEP_MODE_PWR_DOWN*.
2. Deshabilita varios módulos de hardware para reducir el consumo de energía.
3. Entra en modo sleep por el tiempo especificado (*TIEMPO_SLEEP*).
4. Una vez pasado el tiempo de espera, se despierta y vuelve a habilitar los módulos de hardware.

```
void entrarEnModoSleep() {
    unsigned long sleep_time = TIEMPO_SLEEP;

    // Configura el modo de bajo consumo
    set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
    sleep_enable();

    // Deshabilita los temporizadores para reducir el consumo de energía
    power_adc_disable();
    power_spi_disable();
    power_timer0_disable();
    power_timer1_disable();
    power_timer2_disable();
    power_twi_disable();

    // Entra en modo de bajo consumo y espera
    for (unsigned long i = 0; i < sleep_time / 8000; i++) {
        sleep_cpu(); // Entra en modo sleep
    }

    // Despierta y restablece los temporizadores
    sleep_disable();
    power_all_enable();
}
```

Figura 54. Código TX1 parte 6.

3.3. Pruebas

Esta sección está dedicada exclusivamente dedicada a todas aquellas pruebas relevantes realizadas durante el proyecto de cara a comprobar características, alcances, limitaciones, etc. de la tecnología utilizada, tanto en conjunto como individualmente.

PRUEBAS DE MÓDULOS

Se muestran en las siguientes líneas las pruebas realizadas para cada módulo funcional que componen las estaciones.

PRUEBAS SENSORES

- **Prueba con diferentes modelos de sensores**

La realidad a la hora de seleccionar componentes es que, al existir tanta diversidad de opciones, a veces la forma más efectiva de discernir entre las posibilidades existentes es compararlas de forma real sometiéndolas a las mismas situaciones.

Es el caso de los sensores de humedad para el suelo. Se han comprobado varios modelos como el que se ve en la imagen.

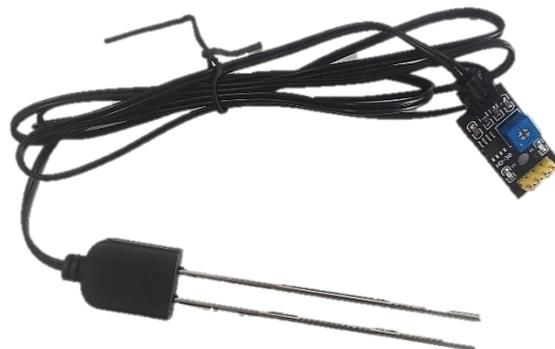


Figura 55. Primer modelo de sensor de humedad.

La prueba ha consistido básicamente en someter los sensores a las dos condiciones extremas, es decir, a una situación de cero humedad (aire) y otra de humedad total (agua).

Los resultados concluyeron que el modelo FC-28 era la mejor opción al tener un rango de valores mayor, y tener mayor sensibilidad. En el caso del modelo

mostrado en la imagen, la variación era realmente pequeña por lo que fue descartado rápidamente.

- **Prueba de calibrado**

La prueba de calibrado sigue el mismo patrón que la anterior, pero centrado en comprobar el rango de valores real que tienen los sensores. Bajo la misma prueba se han sometido los 4 sensores FC-28 que se van a utilizar en el sistema. Los cuatro sensores coinciden prácticamente en sus valores extremos, por lo que podemos afirmar que tienen la misma sensibilidad y rango de valores. Los datos obtenidos de la prueba son los que se muestran a continuación:

Valores de los Sensores

Sensores de Humedad	Valor máximo (V)	Valor máximo (D)	Valor mínimo (V)	Valor mínimo (D)
Sensor 1	4,96 V	1015	1,38 V	282
Sensor 2	4,96 V	1015	1,39 V	285
Sensor 3	4,97 V	1016	1,21 V	248
Sensor 4	4,96 V	1015	1,19 V	242

	Maximo valor	Mínimo valor
Valores generales de caracterización del sensor	4,97	1,19
	1016	242
	0% Humedad	100 % Humedad

Por tanto, obtenidos estos datos se puede realizar una asignación al porcentaje de humedad de valores de entrada del sensor. Hay que tener en cuenta, como se aprecia en las tablas, que los valores máximos de tensión están asociados a una falta de humedad mientras que los valores mínimos de tensión están asociados a un aumento de humedad. Este es el comportamiento del sensor según las especificaciones.

Observar que la tensión de referencia ideal de los sensores es de 5V, pero la real es de 4,97V. Del mismo modo, el valor ideal 0V en la realidad corresponde a 1,19V. Por eso es imprescindible la calibración de nuestros sensores.

La calibración se adjunta en el apartado *Anexos*.

- **Prueba de respuesta**

Esta prueba consiste simplemente en realizar rápidas variaciones en las condiciones de los sensores para comprobar el tiempo de respuesta al cambio que tienen.

Se puede afirmar que tienen una rápida respuesta al cambio de condiciones. Aunque esta prueba no es necesaria para nuestro proyecto, sí es interesante de cara a conocer los elementos que forman parte de nuestro sistema.

PRUEBAS TECNOLOGÍA LoRa

- **Prueba de transmisión y recepción**

La transmisión y recepción de datos mediante tecnología LoRa es quizás la parte más interesante del proyecto. Por tanto, aunque ya se ha visto en el punto referente a la implementación del sistema, vamos a verla de nuevo, pero profundizando más en las pruebas realizadas.

Como ya se comentó, se he realizado un programa de TX y RX de *Hola Mundo* para comprobar el funcionamiento correcto de la implantación en la placa de pruebas. Pero esta prueba no se ha limitado a esto. Se han ido haciendo variaciones diferentes al código de modo que el mensaje cambie y también tome y envíe los datos tomados por un sensor. Todo con éxito.

Aunque quizás lo más relevante de esta primera toma de contacto ha sido, tanto poner a prueba el correcto funcionamiento con las baterías externas como ir alejando paulatinamente las antenas hasta unos 50m.

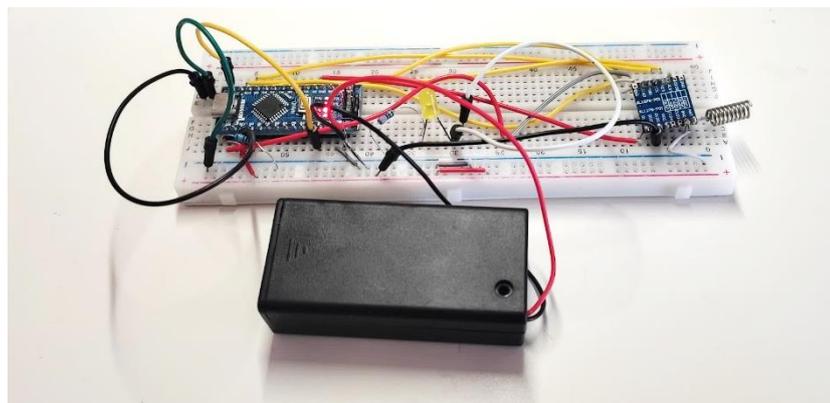


Figura 56. Primeras pruebas de distancia del módulo de transmisión.

Todo ha funcionado como se esperaba en esta prueba. A partir de aquí las pruebas más interesantes serán probar mayores distancias y en distintos entornos.

- **Prueba de Alcance en entorno hostil de interferencias**

Siguiendo el camino mencionado anteriormente, se realiza una prueba en plena ciudad de Sevilla. Se ha colocado el transmisor a 1.48km de distancia del receptor.

Se da el caso de que entre esta distancia se sitúa la estación de Santa Justa, la cual es una zona de alta interferencia debido a la propia actividad de este edificio.



Figura 57. Prueba de la transmisión a 1.48 km de distancia.

El resultado ha sido la recepción de datos altamente corruptos por ruido o interferencias, como se muestra en la imagen. Hay que tener en cuenta que la potencia de estos módulos es pequeña y que, como se ha comentado anteriormente, la zona de transmisión es bastante hostil.



En situaciones cercanas sí parece responder bastante bien. De todas formas, el área de trabajo de este proyecto será el campo donde hay una interferencia bastante reducida. Es ese el siguiente paso a testear, el entorno de trabajo.

- **Prueba de Alcance en entorno de trabajo**

Esta prueba se realiza en la zona donde se va a llevar a cabo el estudio. Durante la realización de esta prueba se produce el fallo en la antena LoRa de una de las estaciones, lo cual ha provocado el retraso en la iniciación del estudio y la interrupción de esta. Con la estación base en el caserío, se ha procedido a tomar uno de los subsistemas de las estaciones de medición e ir alejándolo del receptor con el código de prueba de *Hola Mundo*. En la estación base se situaba una persona que nos ha ayudado indicándonos por teléfono la recepción o no de datos.



Figura 58. Área regenerativa del olivar de estudio.

Se puede afirmar que para un alcance de unos 100 metros se ha realizado transmisiones de forma correcta. Sobre este alejamiento se produjo el fallo de la antena, por lo que la prueba finalizó aquí y no se repitió por el retraso acumulado por la compra de un nuevo módulo LoRa. El fallo se confirmó al no recepcionar datos la estación base a pesar de volver a acercarse el transmisor.

No obstante, se comprobó que funcionaba la transmisión con una distancia suficiente para este trabajo. Aunque, evidentemente, hubiera sido interesante ver el alcance máximo.

PRUEBAS DEL SISTEMA

- **Prueba de funcionamiento instalación**

En esta prueba se comprobado que tras la implantación todo continúa funcionando correctamente. Al instalar, como se ha comentado, se ha compactado la tierra entorno a los sensores, para ello se ha echado un poco de agua en la zona. Esto se ha aprovechado para comprobar de nuevo que los sensores siguen detectando las variaciones de humedad.

También entraría en esta parte comprobar que la alimentación de los subsistemas funciona correctamente. Como se ha comentado anteriormente, a pesar de entrar en modo *sleep* los leds siguen funcionando a no ser que específicamente en el código. En nuestro caso, se ha optado por mantenerlos para comprobar fácilmente que las estaciones están activas.

Finalmente, se ha comprobado que en la estación base la información llega correctamente. La información de cada estación llega aproximadamente a las horas especificadas (08:00h, 16:00h, 00:00h), estableciendo en torno a 1 minuto de desfase entre el envío de TX1 y TX2.

- **Prueba de lluvia**

Esta prueba ha consistido en simular lluvia sobre las estaciones de medida para comprobar que la carcasa protege correctamente el hardware.

Se puede concluir que en condiciones normales de lluvia el hardware queda bien protegido. Las perforaciones son suficientemente pequeñas para permitir el paso de aire, pero no de agua. Evidentemente, en casos de fuerte precipitación acompañada de viento, sí existe alguna posibilidad de entrada de agua, ya que evidentemente no es hermético. Por tanto, se puede afirmar que la prueba está superada.

- **Prueba de Batería**

Esta prueba se ha llevado a cabo durante el propio estudio. A pesar de los cálculos teóricos que predecían unos 18 días de autonomía, la realidad es otra. Como se comentó durante los cálculos, son diversos los factores que afectan a esta parte. El TX1 ha tenido 7 días de autonomía (se incluyen días previos) y el TX2 ha tenido unos 14 días. Esta diferencia a pesar de tener la misma alimentación puede deberse principalmente a la exposición al sol más acusada que recibe la estación TX1.

3.4. Resultados

Los resultados obtenidos del diseño y fabricación del sistema se confirman como satisfactorios. Se puede afirmar que el sistema cumple las funciones fundamentales para las tareas que debe realizar.

Esto se puede comprobar en los resultados de las distintas pruebas expuestas a lo largo de la presente memoria, las cuales confirman que el sistema ha dado han satisfecho las necesidades del proyecto.



Figura 59. Resultado final estaciones instaladas.

El resultado final es un sistema sencillo, dividido en módulos según las tareas y ajustable a nuevos cambios, mejoras y necesidades futuras. Además, hace uso de material reciclado para sus subsistemas lo cual refuerza el compromiso con el medio ambiente.

El sistema permitido realizar correctamente el estudio que se marcaba el trabajo, por lo cual se puede dar por cumplido los objetivos marcados.

PRESUPUESTO TOTAL DEL SISTEMA

Una parte importante en el proyecto es el coste, resultado del diseño o fabricación de un producto. Por ello, es interesante comprobar el coste total del sistema conocidas ya las prestaciones que ofrece.

El presupuesto es el que se muestra a continuación:

Componente	Precio unitario	Cantidad	Total	
Cables	5 €	1	5	€
Pilas 9V recargables	7,42 €	2	14,84	€
Microcontrolador NANO	2,84 €	3	8,52	€
Sensores HORNAXYS	0,51 €	5	2,53	€
Sensor baishundianzi	2,51 €	1	2,51	€
Encapsulado Estaciones (Botellas recicladas)	0 €	2	0	€
Protoboard	8 €	3	24	€
Carcasa batería 9V	2,08 €	2	4,16	€
Módulo LoRa	5,91 €	3	17,73	€
Soldadura	4 €	1	4	€
Resistencias	4,50 €	1	4,5	€
Envíos	9 €	1	9,25	€
TOTAL			97,04	€

4. Estudio

Este punto engloba la segunda parte del Proyecto, el estudio comparativo en términos de conservación de humedad en el suelo entre la agricultura regenerativa y la agricultura tradicional con arado.

Desde aquí se van a exponer, por un lado, los datos obtenidos durante el periodo de estudio, y, por el otro, se va a abordar la interpretación de dichos resultados.

4.1. Datos del Estudio

En este apartado, se van a mostrar los datos obtenidos durante el periodo de estudio. Como se ha mencionado anteriormente, debido a que una de las antenas se ha estropeado durante las pruebas, se ha retrasado un par de semanas el comienzo del estudio.

Se muestra, a continuación, los datos obtenidos de las estaciones de forma tabulada. Estos datos se muestran ordenados por fecha y hora de medición. Junto a estos, se incluyen datos relevantes del estudio como es la meteorología, temperatura, humedad relativa del aire y cantidad de agua caída en ese periodo de tiempo. Todos estos datos tomados de la Agencia Estatal de Meteorología ([Aemet](#)).

DATOS RECOGIDOS DURANTE EL ESTUDIO									
Fecha	Hora	Meteorología	Temp. °C	Humedad relativa (%)	Litros (mm)	Estación TX1		Estación TX2	
						Profundidad 10 cm	Profundidad 20 cm	Profundidad 10 cm	Profundidad 20 cm
27-may	8:00	Cielo despejado	16	30	0	0%	0%	1%	1%
	16:00	Cielo despejado	31	50	0	0%	0%	0%	1%
	0:00	Cielo despejado	21	50	0	0%	0%	0%	1%
28-may	8:00	Cielo despejado	17	25	0	0%	0%	0%	1%
	16:00	Poco Nuboso	33	20	0	0%	0%	0%	1%
	0:00	Cielo despejado	23	75	0	0%	0%	0%	1%
29-may	8:00	Cielo despejado	20	22	0	0%	0%	0%	1%
	16:00	Cielo despejado	36	20	0	0%	0%	0%	0%
	0:00	Cielo despejado	25	44	0	0%	0%	0%	0%
30-may	8:00	Cielo despejado	22	20	0	0%	0%	0%	0%
	16:00	Cielo despejado	37	25	0	0%	0%	0%	0%
	0:00	Cielo despejado	25	55	0	0%	0%	0%	0%
31-may	8:00	Cielo despejado	25	47	0	0%	0%	0%	0%
	16:00	Cielo despejado	37	20	0	--	--	0%	0%
	0:00	Cielo despejado	25	50	0	--	--	0%	0%
01-jun	8:00	Cielo despejado	20	68	0	--	--	2%	1%
	16:00	Cielo despejado	34	25	0	0%	1%	1%	2%
	0:00	Cielo despejado	25	58	0	0%	0%	0%	1%
02-jun	8:00	Cielo despejado	20	77	0	1%	1%	2%	3%
	16:00	Cielo despejado	33	33	0	0%	1%	1%	2%
	0:00	Cielo despejado	25	47	0	0%	0%	0%	2%

03-jun	8:00	Cielo despejado	19	67	0	1%	1%	2%	2%
	16:00	Cielo despejado	34	21	0	0%	1%	1%	3%
	0:00	Cielo despejado	24	55	0	0%	1%	1%	2%
04-jun	8:00	Cielo despejado	18	46	0	0%	1%	1%	2%
	16:00	Cielo despejado	33	21	0	0%	0%	0%	1%
	0:00	Cielo despejado	23	64	0	0%	0%	0%	1%
05-jun	8:00	Cielo despejado	19	83	0	1%	1%	2%	2%
	16:00	Poco Nuboso	35	21	0	0%	1%	1%	3%
	0:00	Poco Nuboso	25	48	0	0%	1%	0%	2%
06-jun	8:00	Nubes Altas	21	40	0	0%	0%	1%	2%
	16:00	Poco Nuboso	36	23	0	0%	0%	0%	1%
	0:00	Nubes Altas	25	59	0	0%	0%	0%	0%
07-jun	8:00	Nuboso	17	74	0	1%	1%	--	--
	16:00	Nuboso	28	50	0	0%	1%	1%	1%
	0:00	Intervalos Nubosos con lluvia	19	77	0,1	7%	4%	8%	5%
08-jun	8:00	Cubierto	16	77	0	5%	7%	6%	8%
	16:00	Cubierto con lluvia escasa	22	57	0,1	3%	5%	4%	7%
	0:00	Cubierto	18	82	0	10%	8%	12%	10%
09-jun	8:00	Muy Nuboso	17	89	0	8%	9%	11%	10%
	16:00	Poco Nuboso	24	55	0	4%	7%	8%	9%
	0:00	Cubierto	19	81	0	2%	7%	4%	8%

El periodo de tiempo en el que se ha realizado el estudio ha tenido una duración final de 14 días, concretamente entre el 27 de mayo y 9 de junio (ambos inclusive).

4.2. Resultados

Los resultados que analizamos en esta parte del proyecto son los obtenidos del estudio. Así pues, es remarcable incidir en que el periodo de tiempo que finalmente ha durado el estudio es relativamente corto y, por tanto, hay que tenerlo en cuenta de cara a las conclusiones finales.

En los datos que se muestran en el apartado anterior se puede extraer información interesante:

- **Batería agotada:** Como era de esperar, la forma de saber si la batería está agotada es la falta de recepción de datos. Esto lo podemos ver el 31 de mayo en la estación TX1 (agricultura tradicional), donde perdemos los datos de tres mediciones. La batería fue repuesta (se colocó la batería de repuesto) la mañana del 1 de junio. Cabe la posibilidad de que esta situación esté influenciada por las altas temperaturas del día (en alerta amarilla de calor), al estar la estación TX1 más expuesta al sol que TX2. Aunque para confirmarlo sería necesario un periodo de estudio mayor.
- **Duración de la Batería:** Siguiendo con la información anterior, se tiene que la estación TX2, en todo el periodo de tiempo de estudio (14 días) no se ha agotado. Sí se aprecian en los últimos datos registrados que aparecen algunos caracteres

aleatorios en la información enviada. Puede ser un indicador de que se aproxima el agotamiento de la batería, al disminuir la potencia de transmisión.

- **Situación de sequía:** Esta situación ya era de sobra conocida, y, de hecho, motivadora del proyecto. Queda constancia en los datos recogidos en los que predomina una falta de humedad importante, al menos en la zona más superficial del suelo.
- **Datos de la humedad del rocío:** Quizás los datos más destacables, comentado lo anterior, son los que difieren de cero. Cabría pensar que los sensores no están bien calibrados, pero nada más lejos de la realidad. Aunque no ha habido precipitaciones durante la primera parte del estudio, aparecen ciertos datos en los que aparece humedad en el suelo.

Analizando los datos meteorológicos que ofrece AEMET se concluye que en los casos recuadrados en azul se ha producido lo que se conoce como rociadas o rocío de la mañana. Esto se da cuando la temperatura es aproximadamente menor de 20°C y la humedad relativa del aire es alta. A esto último, hay que sumar que la zona de estudio se encuentra cerca de la ribera del río Guadaíra, el cual aporta más humedad a la zona.

Cuando se dan estas condiciones, la humedad del aire se condensa y forma gotas que se filtran en la tierra. En el caso de la zona arada, esta humedad se mantiene en menor medida, mientras que en la zona con vegetación se mantiene más. Además, las plantas también parecen ayudar a condensar más humedad, y, por tanto, a extraer más agua del aire. A esto hay que sumarle que dan sombra al suelo evitando la evaporación rápida.

Finalmente, se aprecia cómo a mayor profundidad (20cm) se conserva más la humedad del agua que se va filtrando, lo cual es lógico ya que la acción de los agentes externos atmosféricos es menor a mayor profundidad. En la zona regenerativa, las raíces de las plantas parecen ayudar a mantener aún más esta humedad.

- **La humedad de la lluvia:** En los últimos días del estudio ha parecido unas precipitaciones que, aunque sean bastante escasas, nos ayudan a obtener conclusiones que expondremos posteriormente. Véase en la tabla de datos cómo por un lado con las precipitaciones aumenta la humedad y, por otro, confirma la tendencia que ya se apreciaba con el fenómeno del rocío. Esta tendencia no es otra que la conservación de la humedad en un tiempo más prolongado en la zona regenerativa.

- **Comparación entre ambos modelos de agricultura:** Es la información objetivo del proyecto, por lo que esta información se analizará en la sección Resultado Global.

5. Resultado Global

Finalizado el proyecto, es posible analizar el resultado global del mismo. Se puede afirmar que los resultados han sido favorables, ya que se han cumplido los objetivos inicialmente planteados.

El objetivo general de este proyecto era realizar un estudio que, por una parte, revelara datos sobre los efectos de la sequía en el campo y, por otra, estableciera una comparación entre dos métodos distintos de cultivo del olivar, con el fin de determinar cuál es la mejor opción ante la nueva situación climática.

Gracias a los resultados obtenidos, se puede concluir que hay indicios más que sólidos para considerar la agricultura regenerativa como una apuesta de futuro en la lucha contra la sequía y el cambio climático en el sector agrícola.

Para alcanzar estos resultados, se ha diseñado y utilizado un sistema IoT que permite el monitoreo continuo de la situación hídrica real del campo. Mediante la recolección y análisis de estos datos, se han podido extraer conclusiones finales del estudio. El sistema implementado no solo ha facilitado la obtención de datos precisos y en tiempo real, sino que también ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar el impacto de diferentes prácticas agrícolas en la conservación de la humedad del suelo.

Además, los datos obtenidos y las conclusiones derivadas de este estudio pueden servir como base para futuras investigaciones y prácticas agrícolas más sostenibles y adaptadas al cambio climático.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de forma sencilla para facilitar al lector la comprensión de estos y permitir una mejor interpretación del resultado final del trabajo. A continuación, se muestra gráficamente una comparación de los datos recogidos durante los 14 días de estudio.

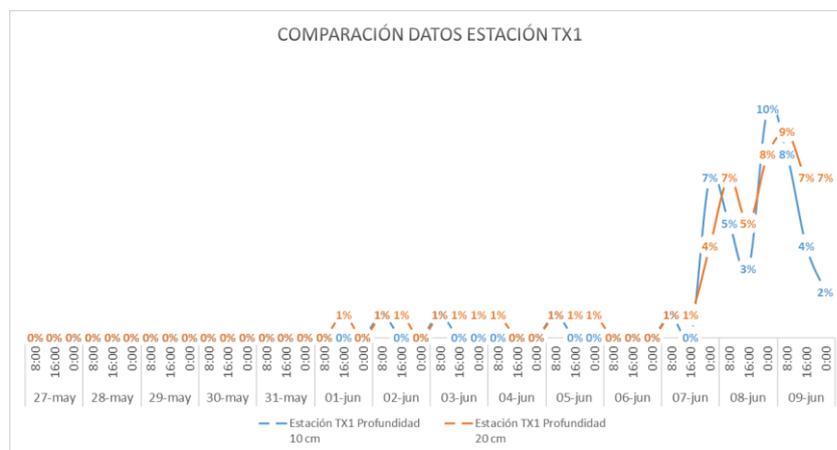


Figura 60. Comparación datos estación TX1.

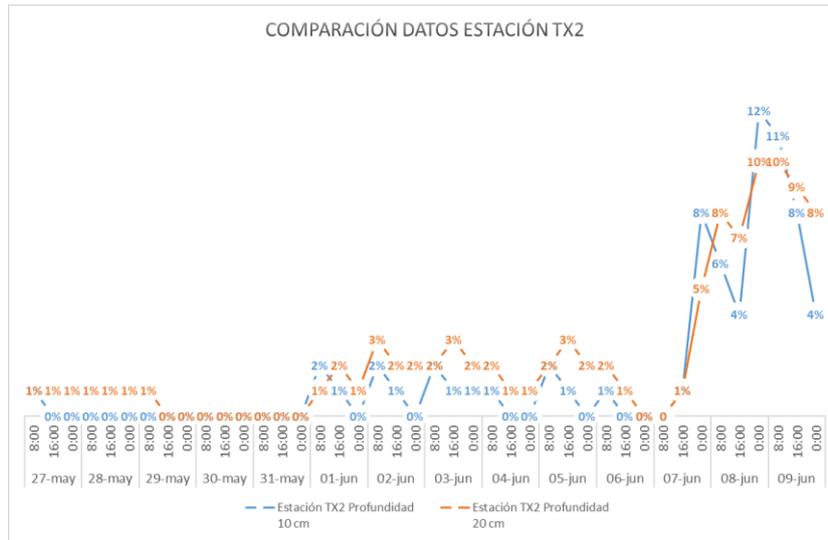


Figura 61. Comparación datos estación TX2.

En las gráficas anteriores se puede apreciar una comparación entre los datos obtenidos a distintas profundidades (10 y 20 cm) de cada estación por separado. De esta forma, es sencillo apreciar cómo los sensores situados a mayor profundidad mantienen más la humedad en el tiempo. Esto se debe principalmente a la menor exposición de esta zona del suelo a los agentes meteorológicos externos.

Para concluir, se compara gráficamente los resultados de ambas estaciones:



Figura 62. Comparación datos de estaciones.

La gráfica nos ayuda a confirmar lo que se ha venido comentando: la estación TX2 muestra cómo la zona regenerativa preserva significativamente más tiempo la humedad del suelo.

Sin embargo, hubiera sido interesante obtener datos tras un periodo de lluvias, lo cual posiblemente nos hubiera permitido ver datos más relevantes al respecto.

De igual manera, cabe mencionar que, para llegar a conclusiones fehacientes, el periodo de estudio debe ser mayor. Aunque estos datos proporcionan información útil, no son suficientes para afirmar rotundamente nuestras premisas. No obstante, animan a continuar investigando en la agricultura regenerativa, ya que se vislumbran resultados positivos.

6. Conclusiones

Tras todo el trabajo realizado, se pueden obtener varias conclusiones referentes a los datos medidos y las tecnologías empleadas.

APOSTAR POR LA AGRICULTURA REGENERATIVA

Se puede concluir que apostar por la agricultura regenerativa promete bastante en la lucha contra la sequía y el cambio climático. Esta práctica permite preservar de forma más eficaz la humedad en el suelo, como se observa en los datos recopilados. Incluso en un periodo de estudio relativamente corto, se obtienen evidencias de que la zona manejada con técnicas regenerativas mantuvo niveles de humedad significativamente más altos en comparación con la zona arada.

Esto sugiere que la agricultura regenerativa tiene el potencial de mejorar la resiliencia del suelo y aumentar su capacidad de retención de agua. Así, se recomienda al sector agrario continuar investigando y validando estos hallazgos mediante estudios a largo plazo. Desde este proyecto proponemos que se dediquen algunas hectáreas de prueba durante varios años para comparar sistemáticamente la evolución de las dos prácticas agrícolas: tradicional y regenerativa.

Entendemos que los cambios en prácticas agrícolas pueden ser desafiantes, pero la agricultura regenerativa representa una opción prometedora para el futuro. Esta metodología no solo respeta el suelo y su biodiversidad, sino que también puede ofrecer soluciones sostenibles a los problemas de sequía, beneficiando tanto al medio ambiente como a los agricultores.



Figura 63. Agricultura regenerativa.

APOSTAR POR EL USO DE IoT EN ZONAS RURALES

El uso de tecnologías IoT (Internet de las Cosas) en zonas rurales se ha demostrado como una herramienta valiosa para la agricultura moderna. Los sensores y dispositivos conectados permiten una monitorización continua y precisa de variables cruciales, como la humedad del suelo, mejorando la toma de decisiones y optimizando el uso de recursos.

En nuestro proyecto, hemos implementado un sistema de medición y transmisión de datos utilizando sensores de humedad del suelo y un módulo LoRa para comunicación inalámbrica de largo alcance. Este sistema no solo proporciona datos en tiempo real, sino que también reduce el consumo energético mediante el uso de modos de bajo consumo en el microcontrolador. La integración de IoT en la agricultura facilita la gestión sostenible del agua y otros recursos, y permite a los agricultores responder rápidamente a las condiciones cambiantes del entorno.

Recomendamos, por tanto, la adopción de soluciones IoT en el sector agrícola, especialmente en zonas rurales. Estas tecnologías pueden ser el camino para una agricultura más eficiente, productiva y sostenible. Al proporcionar datos precisos y en tiempo real, los agricultores pueden mejorar sus prácticas de gestión y contribuir a la resiliencia y sostenibilidad de la producción agrícola.



Figura 64. IoT en la agricultura.

En conclusión, tanto la agricultura regenerativa como la adopción de tecnologías IoT son estrategias viables y complementarias para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la agricultura. Al combinar prácticas agrícolas sostenibles con herramientas tecnológicas

avanzadas, es posible lograr una producción agrícola más resiliente, eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

7. Trabajos futuros

Como en todos los proyectos, siempre hay margen de mejora, especialmente en este tipo donde el periodo de tiempo de realización es bastante ajustado, lo que puede llevar a que ciertos puntos interesantes queden sin abordar. A continuación, se presentan los puntos más prometedores para futuras mejoras del proyecto:

- **Añadir Módulo RTC:** Un módulo RTC (Real-Time Clock) es un componente externo con alimentación propia que proporciona la hora exacta al microcontrolador. Esto es especialmente útil para programar mediciones y transmisiones en momentos específicos, mejorando la precisión y la gestión del tiempo en el proyecto.



Figura 65. Módulo RTC

- **Reducir el consumo en tiempo de espera:** Es posible configurar el microcontrolador para apagar la alimentación de los módulos que no son necesarios durante el modo sleep, así como los LEDs del microcontrolador, para ahorrar más energía. Esto prolongaría la vida útil de la batería y haría el sistema más eficiente energéticamente.
- **Añadir la funcionalidad de detección de agotamiento de batería:** Sería útil incorporar una funcionalidad que detecte el nivel de agotamiento de la batería midiendo la tensión de la misma. Esto permitiría alertar a los usuarios cuando la batería esté baja, evitando interrupciones y pérdida de datos inesperadas en el sistema, y, por ende, del estudio.
- **Añadir sensor de temperatura del aire:** Obtener una mayor cantidad de datos es siempre beneficioso. Entre las variables más importantes para el estudio agronómico se encuentra la temperatura del aire. Incluir un sensor de temperatura permitiría correlacionar estos datos con las mediciones de humedad del suelo, proporcionando una visión más completa del entorno.

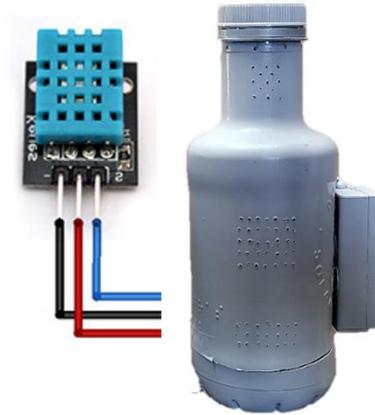


Figura 66. Estación con sensor de temperatura.

- **Almacenamiento automático de datos:** Aunque no se implementó debido a la limitación de tiempo, una mejora significativa sería la programación (mediante VBA) para guardar los datos automáticamente en una hoja de cálculo, como Excel. Esto facilitaría enormemente el proceso de almacenamiento, comparación y análisis de los datos recolectados.
- **Mediciones de humedad a mayores profundidades:** En el proyecto actual, los sensores se han colocado a profundidades relativamente superficiales. Sería conveniente aumentar la profundidad de las mediciones de humedad para obtener datos más representativos y útiles sobre el perfil de humedad en el suelo.



Figura 67. Profundidad sensores.

8. Glosario

CAD: Convertidor Analógico - Digital

IoT: Internet of Things (Internet de las Cosas)

LoRa: Long Range (Larga Distancia)

ODS: Objetivo de Desarrollo Sostenible

PEAD: Polietileno de Alta Densidad

PET: Polietileno Tereftalato

SPI: Serial Peripheral Interface

EB: Estación Base

TX1: Transmisor 1. Estación de Medición de Agricultura tradicional

TX2: Transmisor 2. Estación de Medición de Agricultura Regenerativa

VBA: Microsoft Visual Basic

9. Bibliografía

[1] (16 de Marzo de 2024). Las fuentes de la información proporcionada son las siguientes:

- Sitio Web de Arduino. <https://www.arduino.cc/>
- Sitio Web. ARDUINO: TECNOLOGÍA PARA TODOS. <https://arduinoodhtics.weebly.com/historia.html>
<https://arduinoodhtics.weebly.com/iquestqueacute-es.html>

[2] (16 de Marzo de 2024). Yanping Wang; Zongtao Chi. *System of Wireless Temperature and Humidity Monitoring Based on Arduino Uno platform.* <https://ieeexplore.ieee.org/document/7774887>

[3] (18 de Marzo de 2024). Las fuentes de la información proporcionada son las siguientes:

- Sitio Web. LoRa Alliance. <https://lora-alliance.org/>
- Sitio Web. Semtech. <https://www.semtech.com/lora>
- Sitio Web. *Qué es LoRa, cómo funciona y características principales.* <https://www.vencoel.com/que-es-lora-como-funciona-y-caracteristicas-principales/>
- Sitio Web. *¿QUÉ ES LORA Y CÓMO FUNCIONA?* <https://www.topelectric.es/que-es-lora-y-como-funciona/>
- Sitio Web. *¿Qué es la tecnología LoRa y cómo funciona? – Una guía detallada* <https://iotconsulting.tech/que-es-la-tecnologia-lora-y-por-que-es-importante-para-iot/>

[4] (16 de Marzo de 2024) Antonino Pagano, Daniele Croce, Ilenia Tinnirello, and Gianpaolo Vitale, Senior Member, IEEE. *A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives.* <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9993728>

[5] (16 de Marzo de 2024) Mukarram A. M. Almuhaaya, Waheb A. Jabbar, ORCID, Noorazliza Sulaiman 1 and Suliman Abdulmalek 1. *A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions.* <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/1/164>

[6] (18 de Marzo de 2024). Las fuentes de la información proporcionada son las siguientes:

- Sitio Web. Enciclopedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>
- Artículo. *SENSORES INTELIGENTES: UNA HISTORIA CON FUTURO* <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9553/Article003.pdf>

- Sitio Web. *¿Sabes cuál fue el primer sensor conectado de la historia?*
<https://www.nobbot.com/primer-sensor-conectado/>

[7] (18 de Marzo de 2024) Juan A. GUERRERO-IBAÑEZ, Fermín P. ESTRADA GONZALEZ, Miguel A. MEDINA-TEJEDA Facultad de Telemática, Universidad de Colima. Ma. G. RIVERA-GUTIERREZ, Juan M. ALCARAZ-AGUIRRE, Celso A. MALDONADO-MENDOZA, David TOLEDOZUÑIGA, Victor I. LOPEZ-GONZALEZ Empresa Innova Thing S.A.. *SGreenH-IoT: Plataforma IoT para Agricultura de Precisión.*
<https://www.iiisci.org/journal/pdv/risci/pdfs/ca544si17.pdf>

[8] (20 de Marzo de 2024) Las fuentes de la información proporcionada son las siguientes:

- Sitio Web. *La agricultura regenerativa, origen y principios.*
<https://www.agroptima.com/es/blog/agricultura-regenerativa-origen-y-principios/>
- Sitio Web. *La agricultura regenerativa: Regeneración del suelo*
<https://sostenibleosustentable.com/es/medio-ambiente/la-agricultura-regenerativa-regeneracion-del-suelo/>
- Sitio Web. *Agricultura Regenerativa: ¿Qué es y cómo funciona?*
<https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/agricultura-regenerativa-que-es-y-como-funciona/>
- Sitio Web. *¿Qué es la agricultura regenerativa?*
<https://www.rainforest-alliance.org/es/perspectivas/que-es-la-agricultura-regenerativa/>
- Sitio Web. *Agricultura regenerativa: así se labra el camino hacia un campo más sostenible.*
<https://elpais.com/sociedad/2023-05-18/agricultura-regenerativa-asi-se-labra-el-camino-hacia-un-campo-mas-sostenible.html>
- Sitio Web. *Agricultura regenerativa: ¿Qué es y en qué consiste?*
<https://www.cocampo.com/es/es/noticias/que-es-agricultura-regenerativa/>

[9] (20 de Marzo de 2024) Marcos Javier Meneses Bravo. *Agricultura regenerativa sustentable para promover la diversidad en el suelo.*
<http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14892>

[10] (20 de Marzo de 2024) Manuel Troya Cantos. *EL MANEJO HOLÍSTICO EN LA AGRICULTURA REGENERATIVA: ANÁLISIS DE UN CASO EMPÍRICO.*
<http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-72/manuel-troya.pdf>

[11] (20 de Marzo de 2024) Pérez Casar, María Laura. *Agricultura regenerativa: aliada para un futuro sostenible.* <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/10164#>

[12] (22 de Marzo de 2024) J. P. Tovar Soto, J. de los S. Solórzano Suárez, A. Badillo Rodríguez, y G. O. Rodríguez Cainab. *Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual*.

<https://revistas.ucatolicaluisamigo.edu.co/index.php/lampsakos/article/view/3253/2635>

[13] (22 de Marzo de 2024) Edwin Andrés Quiroga Montoya, Sergio Fernando Jaramillo Colorado, Wilmar Yesid Campo Muñoz, Gabriel Elías Chanchí Golondrino. *Propuesta de una Arquitectura para Agricultura de Precisión Soportada en IoT*.

<https://pdfs.semanticscholar.org/4c6f/37715e4314c1089a009cb5899cbac9a67ce0.pdf>

[14] (22 de Marzo de 2024) H. Choque, Facultad de Ingeniería Universidad Católica Boliviana "San Pablo". *Metodología de Desarrollo de Sistema IoT con LoRaWAN para la Agricultura*.

[https://www.researchgate.net/profile/Hernan-](https://www.researchgate.net/profile/Hernan-Choque/publication/364214016_IoT_System_Development_Methodology_with_LoraWan_f)

[Choque/publication/364214016_IoT_System_Development_Methodology_with_LoraWan_f_or_Agriculture/links/633f58c4ff870c55ce06b007/IoT-System-Development-Methodology-with-LoraWan-for-Agriculture.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hernan-Choque/publication/364214016_IoT_System_Development_Methodology_with_LoraWan_f_or_Agriculture/links/633f58c4ff870c55ce06b007/IoT-System-Development-Methodology-with-LoraWan-for-Agriculture.pdf)

Referencias a trabajos de la UOC

[R1] Tarazona Lizarraga, C. Análisis de las Necesidades de una Smart City en el Marco de un Desarrollo Sostenible; Universitat Oberta de Catalunya: Barcelona, Spain, 2020.

[R2] Monzon Baeza, V.; Alvarez Marban, M. High Altitude Platform Stations Aided Cloud-Computing Solution for Rural-Environment IoT Applications. *Comput. Netw. Commun.* 2022, 1, 85–98.

[R3] Parada, R.; Monzon Baeza, V.; Barraca-Ibort, D.N.; Monzo, C. LoRa-Based Low-Cost Nanosatellite for Emerging Communication Networks in Complex Scenarios. *Aerospace* 2023, 10, 754.

[R4] M. Álvarez Marbán, "Sistema de agricultura inteligente para Smart Rural basado en tecnología emergente," 2022.

[R5] V. M. Baeza, G. Rigazzi, S. Aguilar, R. Ferrús, J. Ferrer, S. Mhatre and M. Guadalupi, "IoT-NTN Communications via Store-And-Forward Core Network in Multi-LEO-Satellite Deployments," 2024 IEEE 35th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops), Valencia, Spain, 2024.

10. Agradecimientos

A mi familia y amigos en general, por su apoyo incondicional siempre. Especialmente, en esta ocasión a mi amigo Manuel, por su predisposición para realizar este proyecto en sus olivares.

A mi tutor de este TFM, Rubén, por su motivación y disponibilidad en todo momento.

Muchas gracias a tod@s.

11. Anexos

11.1. Comparación LoRa VS Sigfox

LoRa VS Sigfox

Ambas LoRa y Sigfox son tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance (LPWAN, por sus siglas en inglés) diseñadas para la Internet de las Cosas (IoT) y aplicaciones de M2M (Machine-to-Machine). Aquí te proporciono una comparación de sus principales características:

	LoRa	Sigfox
Coste	<ul style="list-style-type: none"> · Puede considerarse una pequeña red privada. · Se puede configurar la estación base por uno mismo, con un mayor grado de libertad y menor coste. 	<ul style="list-style-type: none"> · El operador SigFox proporciona el despliegue de la red existente y los servicios en la nube para los usuarios. · Los clientes tienen que pagar una cuota mensual adicional, que es relativamente cara en comparación con LoRa.
Rango de transmisión	<ul style="list-style-type: none"> · Tecnología de espectro ensanchado con una banda de frecuencia más amplia que SigFox, normalmente de 125 kHz o más. · Su frecuencia utiliza la ganancia de codificación para aumentar la sensibilidad del receptor. · El rango de transmisión de LoRa puede ser de hasta 20 kilómetros. 	<ul style="list-style-type: none"> · Tecnología de banda estrecha (o ultra-estrecha) · Método de transmisión de radio estándar BPSK. · Distancia de transmisión de hasta 50 km
Dificultad de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> · Con LoRa es necesario configurar la estación base y construir la red por sí mismo. 	<ul style="list-style-type: none"> · La plataforma de SigFox es completa, no se requiere ninguna red adicional y es relativamente sencilla de utilizar.
Escenario de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> · Se puede construir y gestionar la red uno mismo, y el coste es bajo. · Es la mejor opción en aplicaciones que requieren funciones de mando y control, como la monitorización de redes. 	<ul style="list-style-type: none"> · La comunicación SigFox requiere el equipo de la estación base del proveedor de servicios. · Las zonas que no están cubiertas por las señales móviles, como minas y túneles subterráneos, zonas montañosas, etc., SigFox no puede utilizarse en este caso. · También es una buena opción para aplicaciones con una distancia de comunicación más lejana y una pequeña cantidad de datos.
Modulación y Espectro	<ul style="list-style-type: none"> · Modulación de espectro ensanchado (CSS), que permite una mayor resistencia a las interferencias y un mejor rendimiento en entornos con obstáculos. Opera en las bandas de frecuencia no licenciadas (como 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz). 	<ul style="list-style-type: none"> · Emplea una técnica de modulación ultr estrecha (UNB), que utiliza un ancho de banda muy estrecho (100 Hz) para transmitir datos. Opera en bandas de frecuencia no licenciadas y licenciadas, dependiendo de la región.
Alcance y Cobertura	<ul style="list-style-type: none"> · Ofrece un alcance de hasta varios kilómetros en áreas urbanas y hasta decenas de kilómetros en áreas rurales, dependiendo de las condiciones del terreno y la potencia de transmisión. 	<ul style="list-style-type: none"> · Proporciona un alcance similar a LoRa, pero puede ser más limitado en áreas densamente pobladas debido a la técnica de modulación ultr estrecha.
Consumo de Energía	<ul style="list-style-type: none"> · Es conocido por su eficiencia energética, lo que permite una vida útil prolongada de la batería en dispositivos IoT. 	<ul style="list-style-type: none"> · También es eficiente en términos de consumo de energía, lo que lo hace adecuado para dispositivos con requisitos de energía mínimos.
Capacidad de Tráfico	<ul style="list-style-type: none"> · Ofrece una mayor capacidad de tráfico de datos en comparación con Sigfox, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones que requieren una transmisión de datos más frecuente o mayor cantidad de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Está optimizado para aplicaciones que transmiten pequeñas cantidades de datos de manera esporádica.
Flexibilidad y Personalización	<ul style="list-style-type: none"> · Proporciona una mayor flexibilidad en términos de configuración y personalización de la red, lo que permite a los desarrolladores ajustar parámetros como la tasa de transmisión, la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor. 	<ul style="list-style-type: none"> · Ofrece una infraestructura más estandarizada y centralizada, lo que puede limitar la flexibilidad en comparación con LoRa.
Ecosistema y Soporte	<ul style="list-style-type: none"> · Cuenta con un ecosistema amplio y diverso de fabricantes de chips, dispositivos y proveedores de servicios, lo que facilita su adopción y despliegue. 	<ul style="list-style-type: none"> · Aunque cuenta con un creciente número de socios y adoptantes, su ecosistema puede ser más limitado en comparación con LoRa.

11.2. Calibración de los sensores de humedad

CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR							
1020	0%	812	26%	612	51%	412	76%
1019		811		611		411	
1018		810		610		410	
1017		809		609		409	
1016		808		608		408	
1015		807		607		407	
1014		806		606		406	
1013	805	605	405				
1012	1%	804	27%	604	52%	404	77%
1011		803		603		403	
1010		802		602		402	
1009		801		601		401	
1008		800		600		400	
1007		799		599		399	
1006		798		598		398	
1005	797	597	397				
1004	2%	796	28%	596	53%	396	78%
1003		795		595		395	
1002		794		594		394	
1001		793		593		393	
1000		792		592		392	
999		791		591		391	
998		790		590		390	
997	789	589	389				
996	3%	788	29%	588	54%	388	79%
995		787		587		387	
994		786		586		386	
993		785		585		385	
992		784		584		384	
991		783		583		383	
990		782		582		382	
989	781	581	381				
988	4%	780	30%	580	55%	380	80%
987		779		579		379	
986		778		578		378	
985		777		577		377	
984		776		576		376	
983		775		575		375	
982		774		574		374	

981		773		573		373	
980	5%	772	31%	572	56%	372	81%
979		771		571		371	
978		770		570		370	
977		769		569		369	
976		768		568		368	
975		767		567		367	
974		766		566		366	
973		765		565		365	
972	6%	764	32%	564	57%	364	82%
971		763		563		363	
970		762		562		362	
969		761		561		361	
968		760		560		360	
967		759		559		359	
966		758		558		358	
965		757		557		357	
964	7%	756	33%	556	58%	356	83%
963		755		555		355	
962		754		554		354	
961		753		553		353	
960		752		552		352	
959		751		551		351	
958		750		550		350	
957		749		549		349	
956	8%	748	34%	548	59%	348	84%
955		747		547		347	
954		746		546		346	
953		745		545		345	
952		744		544		344	
951		743		543		343	
950		742		542		342	
949		741		541		341	
948	9%	740	35%	540	60%	340	85%
947		739		539		339	
946		738		538		338	
945		737		537		337	
944		736		536		336	
943		735		535		335	
942		734		534		334	
941		733		533		333	
940	10%	732	36%	532	61%	332	86%
939		731		531		331	

938		730		530		330	
937		729		529		329	
936		728		528		328	
935		727		527		327	
934		726		526		326	
933		725		525		325	
932		724		524		324	
931		723		523		323	
930		722		522		322	
929	11%	721	37%	521	62%	321	87%
928		720		520		320	
927		719		519		319	
926		718		518		318	
925		717		517		317	
924		716		516		316	
923		715		515		315	
922		714		514		314	
921	12%	713	38%	513	63%	313	88%
920		712		512		312	
919		711		511		311	
918		710		510		310	
917		709		509		309	
916		708		508		308	
915		707		507		307	
914		706		506		306	
913	13%	705	39%	505	64%	305	89%
912		704		504		304	
911		703		503		303	
910		702		502		302	
909		701		501		301	
908		700		500		300	
907		699		499		299	
906		698		498		298	
905	14%	697	40%	497	65%	297	90%
904		696		496		296	
903		695		495		295	
902		694		494		294	
901		693		493		293	
900		692		492		292	
899		691		491		291	
898	15%	690	41%	490	66%	290	91%
897		689		489		289	
896		688		488		288	

895		687		487		287	
894		686		486		286	
893		685		485		285	
892	16%	684	42%	484	67%	284	92%
891		683		483		283	
890		682		482		282	
889		681		481		281	
888		680		480		280	
887		679		479		279	
886		678		478		278	
885		677		477		277	
884	17%	676	43%	476	68%	276	93%
883		675		475		275	
882		674		474		274	
881		673		473		273	
880		672		472		272	
879		671		471		271	
878		670		470		270	
877		669		469		269	
876	18%	668	44%	468	69%	268	94%
875		667		467		267	
874		666		466		266	
873		665		465		265	
872		664		464		264	
871		663		463		263	
870		662		462		262	
869		661		461		261	
868	19%	660	45%	460	70%	260	95%
867		659		459		259	
866		658		458		258	
865		657		457		257	
864		656		456		256	
863		655		455		255	
862		654		454		254	
861		653		453		253	
860	20%	652	46%	452	71%	252	96%
859		651		451		251	
858		650		450		250	
857		649		449		249	
856		648		448		248	
855		647		447		247	
854		646		446		246	
853		645		445		245	

852	21%	644	47%	444	72%	244	97%			
851		643		443		243				
850		642		442		242				
849		641		441		241				
848		640		440		240				
847		639		439		239				
846		638		438		238				
845	22%	637	48%	437	73%	237	98%			
844		636		436		236				
843		635		435		235				
842		634		434		234				
841		633		433		233				
840		632		432		232				
839		631		431		231				
838	23%	630	49%	430	74%	230	99%			
837		629		429		229				
836		628		428		228				
835		627		427		227				
834		626		426		226				
833		625		425		225				
832		624		424		224				
831	24%	623	50%	423	75%	223	100%			
830		622		422		222				
829		621		421		221				
828		620		420		220				
827		619		419		219				
826		618		418		218				
825		617		417		217				
824	25%	616		416		216				
823		615		415		215				
822		614		414		214				
821		613		413		213				
820										
819										
818										
817										
816										
815										
814										
813										

11.3. Códigos

ESTACIÓN BASE

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Receiver ready!");
}

void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    String receivedText = "";
    while (LoRa.available()) {
      receivedText += (char)LoRa.read();
    }

    Serial.println(receivedText);
  }
}
```

ESTACIÓN DE MEDIDA TX1

```

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <avr/power.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2

// Define los pines analógicos utilizados por los sensores
#define PIN_SENSOR_A1 A1
#define PIN_SENSOR_A2 A2

// Define el tiempo en milisegundos para 8 horas
#define TIEMPO_SLEEP 28800000 // 8 horas en milisegundos

int contador_medidas = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Transmitter ready!");
}

void loop() {
  // Realiza la medición
  realizarMedicion();

  // Entra en modo de bajo consumo y espera hasta la próxima medición
  entrarEnModoSleep();
}

void realizarMedicion() {
  // Lee el valor analógico del sensor de humedad del suelo a 10 cm de profundidad

```

```

int valor_analogico_A1 = analogRead(PIN_SENSOR_A1);

// Lee el valor analógico del sensor de humedad del suelo a 20 cm de profundidad
int valor_analogico_A2 = analogRead(PIN_SENSOR_A2);

// Calcula los porcentajes para cada sensor
int porcentaje_A1 = calcularPorcentaje(valor_analogico_A1);
int porcentaje_A2 = calcularPorcentaje(valor_analogico_A2);

// Determina la hora de medida basada en el contador
String hora_medida;
if (contador_medidas % 3 == 0) {
    hora_medida = "08:00";
} else if (contador_medidas % 3 == 1) {
    hora_medida = "16:00";
} else {
    hora_medida = "00:00";
}

contador_medidas++;

// Envía los datos por LoRa
LoRa.beginPacket();
LoRa.print("TX1: Estación Agricultura Tradicional\n");
LoRa.print("Hora de medida: ");
LoRa.print(hora_medida);
LoRa.print(" h\nHumedad del suelo (10cm): ");
LoRa.print(porcentaje_A1);
LoRa.print("%\nHumedad del suelo (20cm): ");
LoRa.print(porcentaje_A2);
LoRa.print("%");
LoRa.endPacket();

// Imprime el mensaje enviado por LoRa en el monitor serial
Serial.print("Mensaje enviado por LoRa:\nTX1: Estación Agricultura Tradicional\n");
Serial.print("Hora de medida: ");
Serial.print(hora_medida);
Serial.print(" h\nHumedad del suelo (10cm): ");
Serial.print(porcentaje_A1);
Serial.print("%\nHumedad del suelo (20cm): ");
Serial.print(porcentaje_A2);
Serial.println("%");
}

```

```

int calcularPorcentaje(int valor_analogico) {
    int porcentaje;

    if (valor_analogico >= 1013) {
        porcentaje = 0;
    } else if (valor_analogico <= 220) {
        porcentaje = 100;
    } else {
        porcentaje = map(valor_analogico, 213, 1020, 100, 0);
    }

    return porcentaje;
}

void entrarEnModoSleep() {
    unsigned long sleep_time = TIEMPO_SLEEP;

    // Configura el modo de bajo consumo
    set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
    sleep_enable();

    // Deshabilita los temporizadores para reducir el consumo de energía
    power_adc_disable();
    power_spi_disable();
    power_timer0_disable();
    power_timer1_disable();
    power_timer2_disable();
    power_twi_disable();

    // Entra en modo de bajo consumo y espera
    for (unsigned long i = 0; i < sleep_time / 8000; i++) {
        sleep_cpu(); // Entra en modo sleep
    }

    // Despierta y restablece los temporizadores
    sleep_disable();
    power_all_enable();
}

```

ESTACIÓN DE MEDIDA TX2

```

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <avr/power.h>

#define NSS_PIN 10
#define RESET_PIN 9
#define DIO2_PIN 2

// Define los pines analógicos utilizados por los sensores
#define PIN_SENSOR_A1 A1
#define PIN_SENSOR_A2 A2

// Define el tiempo en milisegundos para 8 horas
#define TIEMPO_SLEEP 28800000 // 8 horas en milisegundos

int contador_medidas = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  LoRa.setPins(NSS_PIN, RESET_PIN, DIO2_PIN);
  if (!LoRa.begin(868E6)) {
    Serial.println("Initialization failed!");
    while (true);
  }

  Serial.println("Transmitter ready!");
}

void loop() {
  // Realiza la medición
  realizarMedicion();

  // Entra en modo de bajo consumo y espera hasta la próxima medición
  entrarEnModoSleep();
}

void realizarMedicion() {
  // Lee el valor analógico del sensor de humedad del suelo a 10 cm de profundidad

```

```

int valor_analogico_A1 = analogRead(PIN_SENSOR_A1);

// Lee el valor analógico del sensor de humedad del suelo a 20 cm de profundidad
int valor_analogico_A2 = analogRead(PIN_SENSOR_A2);

// Calcula los porcentajes para cada sensor
int porcentaje_A1 = calcularPorcentaje(valor_analogico_A1);
int porcentaje_A2 = calcularPorcentaje(valor_analogico_A2);

// Determina la hora de medida basada en el contador
String hora_medida;
if (contador_medidas % 3 == 0) {
    hora_medida = "08:00";
} else if (contador_medidas % 3 == 1) {
    hora_medida = "16:00";
} else {
    hora_medida = "00:00";
}

contador_medidas++;

// Envía los datos por LoRa
LoRa.beginPacket();
LoRa.print("TX2: Estación Agricultura Regenerativa\n");
LoRa.print("Hora de medida: ");
LoRa.print(hora_medida);
LoRa.print(" h\nHumedad del suelo (10cm): ");
LoRa.print(porcentaje_A1);
LoRa.print("%\nHumedad del suelo (20cm): ");
LoRa.print(porcentaje_A2);
LoRa.print("%");
LoRa.endPacket();

// Imprime el mensaje enviado por LoRa en el monitor serial
Serial.print("Mensaje enviado por LoRa:\nTX2: Estación Agricultura Regenerativa\n");
Serial.print("Hora de medida: ");
Serial.print(hora_medida);
Serial.print(" h\nHumedad del suelo (10cm): ");
Serial.print(porcentaje_A1);
Serial.print("%\nHumedad del suelo (20cm): ");
Serial.print(porcentaje_A2);
Serial.println("%");
}

```

```

int calcularPorcentaje(int valor_analogico) {
    int porcentaje;

    if (valor_analogico >= 1013) {
        porcentaje = 0;
    } else if (valor_analogico <= 220) {
        porcentaje = 100;
    } else {
        porcentaje = map(valor_analogico, 213, 1020, 100, 0);
    }

    return porcentaje;
}

void entrarEnModoSleep() {
    unsigned long sleep_time = TIEMPO_SLEEP;

    // Configura el modo de bajo consumo
    set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);
    sleep_enable();

    // Deshabilita los temporizadores para reducir el consumo de energía
    power_adc_disable();
    power_spi_disable();
    power_timer0_disable();
    power_timer1_disable();
    power_timer2_disable();
    power_twi_disable();

    // Entra en modo de bajo consumo y espera
    for (unsigned long i = 0; i < sleep_time / 8000; i++) {
        sleep_cpu(); // Entra en modo sleep
    }

    // Despierta y restablece los temporizadores
    sleep_disable();
    power_all_enable();
}

```