

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



E.T.S.I. TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS
ESPECÍFICAS DE TELECOMUNICACIÓN
MENCIÓN EN TELEMÁTICA

**Plataforma de Ciencia Ciudadana para la
Monitorización de Cobertura Móvil y Calidad del
Aire en Zonas Rurales**

Autor:

Sandra Torrero Casado

Tutor:

Dña. Noemí Merayo Álvarez

TÍTULO: Plataforma de Ciencia Ciudadana para la Monitorización de Cobertura Móvil y Calidad del Aire en Zonas Rurales

AUTOR: Sandra Torrero Casado

TUTOR: Dña. Noemí Merayo Álvarez

DEPARTAMENTO: Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

TRIBUNAL

PRESIDENTE: Noemí Merayo Álvarez

SECRETARIO: Lara del Val Puente

VOCAL: Ramón de la Rosa Steinz

SUPLENTE: Juan Carlos Aguado Manzano

SUPLENTE: Patricia Fernández del Reguero

FECHA:

CALIFICACIÓN:

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se presenta el desarrollo de una aplicación web orientada a la visualización de datos ciudadanos relacionados con la cobertura móvil y la calidad del aire en zonas rurales de España. La plataforma, construida con tecnologías web estándar (PHP, JavaScript, HTML y Leaflet), permite representar en un mapa interactivo los datos introducidos por la población mediante formularios, los cuales son procesados con scripts en Python y almacenados en una base de datos PostgreSQL con extensión PostGIS.

El sistema se estructura en dos partes principales: la recogida colaborativa de datos sobre intensidad de señal móvil y concentración de contaminantes atmosféricos, y la visualización agregada de dichos datos en formato geoespacial y gráfico. La aplicación permite mostrar un punto por operador y tecnología sin restricción temporal, así como un punto por contaminante en los últimos 30 días, calculando la media de las concentraciones registradas. Además, se han implementado mecanismos de validación geográfica para asegurar que los registros se encuentren dentro del territorio español.

El proyecto persigue un doble objetivo: por un lado, facilitar el análisis técnico de la conectividad y la calidad ambiental en zonas poco representadas; por otro, fomentar la participación ciudadana en proyectos científicos, especialmente entre estudiantes de secundaria, promoviendo vocaciones STEM (*Science, Technology, Engineering, Mathematics*) a través de la ciencia abierta y el uso de herramientas accesibles.

Palabras clave

Ciencia ciudadana; zonas rurales; cobertura móvil; calidad del aire; visualización geoespacial; Supabase; Leaflet; Python; aplicación web; participación pública; STEM

Abstract

This Final Degree Project presents the development of a web application designed to visualize citizen data related to mobile coverage and air quality in rural areas of Spain. The platform, built with standard web technologies (PHP, JavaScript, HTML and Leaflet), allows data entered by the population via forms to be represented on an interactive map. This data is processed using Python scripts and stored in a PostgreSQL database with PostGIS extension.

The system is structured in two main parts: the collaborative collection of data on mobile signal strength and atmospheric pollutant concentrations, and the aggregated visualization of this data in geospatial and graphical format. The application allows one point per operator and technology to be displayed without time restrictions, as well as one point per pollutant in the last 30 days, calculating the average of the concentrations recorded. In addition, geographical validation mechanisms have been implemented to ensure that the records are within Spanish territory.

The project has a dual objective: on the one hand, to facilitate the technical analysis of connectivity and environmental quality in under-represented areas; on the other, to encourage citizen participation in scientific projects, especially among secondary school students, promoting STEM (*Science, Technology, Engineering, Mathematics*) vocations through open science and the use of accessible tools.

Keywords

Citizen science; rural areas; mobile coverage; air quality; geospatial visualization; PostgreSQL; PostGIS; Leaflet; Python; web app; public participation; STEM

Agradecimientos

A todos aquellos que han acompañado durante la realización de los estudios, y en especial, durante la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

A mi familia y amigos, con mención especial a todos mis apoyos en la banda, qué bonita es la música y más cuando une de esta manera a las personas.

Y, por último, a mi tutora, Noemí, sin tu guía este proyecto no hubiese tenido este resultado. Gracias por tu confianza y tu acompañamiento estos meses.

Índice

Agradecimientos	vii
Índice	viii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiii
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivos Generales	2
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Fases y metodología.....	3
1.3.1 Fase de Análisis	3
1.3.2 Fase de Implementación.....	4
1.3.3 Fase de Pruebas.....	4
1.4 Estructura de la Memoria del TFG	5
2 Marco teórico	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 Introducción a la Ciencia Ciudadana	7
2.3 Proyecto de Ciencia <i>RurAirConnect</i>	10
2.4 Cobertura Móvil 4G/5G	12
2.5 Contaminación ambiental y sensores portátiles	16
2.5.1 Definición de contaminantes atmosféricos principales.....	17
2.5.2 Índices de calidad del aire	18
2.5.3 Instrumentación tradicional para la medición de calidad del aire	21
2.5.4 Sensores de medición de calidad del aire de bajo coste	21

2.5.5	Metodología de medición y temporalidad.....	23
2.5.6	Parámetros implementados en RurAirConnect	23
2.5.7	Consideraciones para la implementación en ciencia ciudadana	24
2.6	Tecnologías y herramientas software usadas	25
2.6.1	Captura y procesamiento de datos	25
2.6.2	Almacenamiento y base de datos.....	26
2.6.3	Desarrollo y visualización web.....	27
3	Diseño de la arquitectura y obtención de datos	28
3.1	Introducción.....	28
3.2	Arquitectura general de la plataforma RurAirConnect.....	28
3.2.1	Capa de captura de datos	29
3.2.2	Capa de procesamiento y almacenamiento.....	30
3.2.3	Capa de presentación y visualización web	31
3.2.4	Flujo de datos y comunicación entre capas	31
3.2.5	Consideraciones de rendimiento y escalabilidad	33
3.3	Obtención de datos de cobertura móvil	33
3.3.1	Evaluación de alternativas para la medición de cobertura móvil	33
3.3.2	Captura de datos de cobertura móvil con smartphones.....	37
3.4	Captura de datos ambientales mediante sensores portátiles.....	45
3.4.1	Contexto profesional de medición de calidad del aire	45
3.4.2	Alternativas para la medición de parámetro de calidad del aire	46
4	Desarrollo de la aplicación RurAirConnect.....	49
4.1	Introducción.....	49
4.2	Interfaz web y experiencia de usuario	50
4.2.1	Estructura de navegación y componentes web	50
4.2.2	Página de inicio y presentación del proyecto	51
4.2.3	Sección “¿Cómo funciona?”.....	52

4.2.4	Visualización cartográfica “Descubre el mapa”	53
4.2.5	Página de resultados.....	59
4.2.6	Sección de contacto.....	66
4.3	Sistema de captura de datos	67
4.3.1	Integración del formulario en “Participa tú”	68
4.3.2	Comunicación de la ubicación al formulario Google Forms.....	72
4.3.3	Estructura y campos del formulario Google Forms.....	74
4.3.4	Integración con la base de datos	76
4.4	Diseño e implementación de la base de datos	79
4.4.1	Modelo de datos relacional.....	80
4.4.2	Estructura de tablas y relaciones.....	80
4.4.3	Optimización para consultas geoespaciales.....	83
4.4.4	Procedimientos y vistas para la aplicación web	84
4.5	Limitaciones y observaciones	87
4.5.1	Restricciones geográficas y de alcance del proyecto	87
4.5.2	Limitaciones temporales y de procesamiento de datos	88
4.5.3	Consideraciones sobre rendimiento y escalabilidad	88
4.5.4	Limitaciones en la validación y calidad de los datos	89
4.5.5	Limitaciones de interfaz y experiencia de usuario.....	90
4.5.6	Dependencias técnicas y consideraciones arquitecturales.....	91
5	Conclusiones y líneas futuras	92
5.1	Conclusiones	92
5.2	Líneas futuras	94
6	Bibliografía.....	97

Índice de figuras

Figura 1: Relación entre ciencia ciudadana y Ciencia Abierta. Fuente [2]	7
Figura 2: Integración de la Ciencia Ciudadana en el proceso de generación de conocimiento científico. Fuente [2]	8
Figura 3. Diagrama de arquitectura por capas y comunicación entre componentes del sistema.	32
Figura 4. Analizador de espectro portátil TinySA Ultra.	35
Figura 5. Ejemplo de configuración de modos de red en un smartphone Samsung A54..	38
Figura 6. Ejemplo de la información de señal mostrada por la aplicación Netmonitor en dispositivo Android.	40
Figura 7. Información de parámetros de señal móvil obtenidos desde la sección de Ajustes de un dispositivo Samsung.	42
Figura 8. Ejemplos de pantallas visualizadas en la aplicación "Network Cell Info Lite" con datos de cobertura móvil.	43
Figura 9. Visualización de datos en <i>Field Test Mode</i> de iOS en un dispositivo iPhone...	44
Figura 10. Instrumento de medida doméstico empleado durante las pruebas de la aplicación.....	47
Figura 11. Página de inicio de <i>RurAirConnect</i> : presentación del proyecto y áreas de trabajo	52
Figura 12. Sección "¿Cómo funciona?": explicación de conceptos.....	53
Figura 13. Vista inicial de "Explora el mapa" con geometría de Castilla y León resaltada.	54
Figura 14. Visualización de datos de cobertura móvil 4G.	55
Figura 15. Visualización de datos de concentración de Partículas PM 2.5 en el mapa.	56
Figura 16. Detalle del mapa con ejemplos visuales de agrupación (clustering) y despliegue radial (spiderfier) en zona urbana.	57
Figura 17. Comparativa de la interfaz de selección de capas para cobertura móvil y contaminación atmosférica.	58
Figura 18. Funcionamiento del Botón para mostrar y ocultar el control de capas en móviles.	59

Figura 19. Interfaz de filtros para datos de señal móvil.	61
Figura 20. Interfaz de filtros para el análisis de datos de contaminación ambiental	62
Figura 21. Gráfico de barras sobre cobertura móvil en la provincia de Zamora: intensidad media por operador	63
Figura 22. Gráfico sobre la variación de CO (ppm) en Zamora durante el periodo de análisis	64
Figura 23. Sección de contacto: formulario de comunicación con verificación hCAPTCHA	66
Figura 24. Diagrama de flujo del sistema de captura de datos	67
Figura 25. Vista del iframe embebido en la sección “Participa tú” esperando ubicación. 69	
Figura 26. Visualización de la pantalla cuando la ubicación está activada y el usuario concede permisos de ubicación.....	69
Figura 27: Vista de la edición en el mapa.	71
Figura 28. Vista de la edición mediante formulario.....	71
Figura 29. Vista de la web generada con Google Apps Script cuando no se puede obtener la geolocalización del usuario.....	72
Figura 30. Ejemplo de campo prerrellenado en el formulario tras confirmar la geolocalización.	74
Figura 31. Vista de la parte superior del formulario Google Forms con breves instrucciones y campos iniciales	75
Figura 32. Hoja de cálculo con una muestra de las respuestas recogidas	76
Figura 33. Diagrama de la estructura condicional del sistema de validación de datos	78
Figura 34. Diagrama de Entidad-Relación de la base de datos	81

Índice de tablas

Tabla 1. Bandas y concentraciones definidas en el ICA [22].....	19
Tabla 2. Rangos de referencia del AQI estadounidense por contaminante y categoría de calidad del aire. Fuente [23]	20
Tabla 3. Campos del formulario Google Forms y características técnicas	75

1

Introducción

1.1 Motivación

La contaminación ambiental representa uno de los desafíos más críticos de nuestro tiempo, especialmente en el contexto urbano donde la concentración de actividades industriales y el tráfico vehicular generan niveles preocupantes de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, la monitorización tradicional de la calidad del aire se encuentra limitada por la escasez de estaciones de medición oficiales y la falta de cobertura territorial, particularmente en zonas rurales y periféricas.

En este contexto, la ciencia ciudadana emerge como una herramienta transformadora que democratiza la recolección de datos ambientales, permitiendo que la población general contribuya activamente al conocimiento científico. La participación ciudadana en la monitorización ambiental no solo amplía la cobertura geográfica de los datos disponibles, sino que también fomenta la concienciación pública sobre los problemas ambientales y promueve una cultura científica en la sociedad.

La utilidad de esta aproximación se hace especialmente evidente en situaciones de emergencia ambiental, como los incendios forestales registrados en España durante el verano de 2025. Estos eventos, frecuentes en zonas rurales y de montaña con deficiente cobertura móvil, generan un deterioro significativo de la calidad del aire debido a la emisión de partículas contaminantes, afectando a territorios mucho más amplios que las áreas directamente incendiadas. En tales contextos, contar con datos complementarios aportados por la ciudadanía puede ser clave para evaluar los impactos sobre la salud pública y mejorar la resiliencia frente a futuros episodios de esta naturaleza, además de permitir contar con datos objetivos acerca de donde resulta necesario realizar mejoras en la infraestructura de telecomunicaciones.

El presente trabajo surge de la necesidad de desarrollar una plataforma tecnológica que facilite la visualización y análisis de datos ambientales y de intensidad de señal móvil recopilados por ciudadanos, con especial énfasis en el territorio español. La motivación principal radica en crear una herramienta accesible que permita transformar datos dispersos en información visual comprensible, facilitando tanto la toma de decisiones informadas como la educación ambiental.

Desde una perspectiva educativa y social, este proyecto busca contribuir al fomento de las vocaciones STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) en centros de educación secundaria, proporcionando un caso de uso real donde los estudiantes puedan observar la aplicación práctica de conceptos científicos y tecnológicos en la resolución de problemas ambientales contemporáneos, al mismo tiempo que se introduce de manera didáctica el estudio de señales de comunicaciones, la noción de cobertura y la relación de estas con el territorio, fomentando un aprendizaje interdisciplinar y aplicado.

Finalmente, la elección de tecnologías web estándar (PHP, JavaScript, HTML) y herramientas de visualización cartográfica (Leaflet) responde a la necesidad de crear una solución robusta, mantenible y escalable, que pueda servir como base para futuras mejoras y extensiones del sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivos Generales*

Los objetivos generales de este trabajo son dos. En primer lugar, diseñar e implementar una aplicación web, denominada *RurAirConnect*, para medir la calidad ambiental y la cobertura de señales móviles y especialmente dirigida a la Ciencia Ciudadana en entornos rurales. La aplicación consta de dos partes o componentes principales. Por una parte, recopilar datos sobre intensidad de señal de redes móviles y de concentración de contaminantes aéreos en exteriores; contando con la colaboración ciudadana para la recogida de mediciones. Y, por otro lado, una segunda parte que consiste en visualizar y procesar los datos recogidos por los usuarios.

En segundo lugar, hacer partícipe de proyectos científicos a la población general, ofreciendo un espacio donde puedan colaborar recopilando y visualizando datos relacionados con las redes móviles actuales y la calidad del aire exterior. Todo ello en el

ámbito del territorio español y con especial interés en las zonas rurales. En concreto, esta aplicación se ha centrado en la Comunidad Autónoma de Castilla y León.

1.2.2 Objetivos específicos

Se describen, a continuación, los objetivos específicos necesarios para la consecución de los objetivos generales ya comentados.

1. Estudiar la viabilidad de equipos de medición portátiles de bajo coste y de elementos cotidianos como sensores de intensidad de señal móvil y concentración de contaminantes aéreos, que sean accesible para la población general.
2. Diseñar y desarrollar una aplicación web que incluya la explicación de los procedimientos de medida y la recogida de datos mediante formularios.
3. Desarrollar el sistema de visualización de datos recopilados, de manera que la población general pueda interpretar en un mapa la calidad de las medidas tomadas, realizando para ello cálculos geoespaciales y agregación de puntos en coordenadas cercanas.
4. Desarrollar un sistema de visualización de resultados en formato gráfica donde se agreguen los datos por operador o por contaminante y por provincias de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.

1.3 Fases y metodología

Se procede a detallar las fases seguidas y la metodología llevada a cabo en cada una de ellas durante la realización de este trabajo.

1.3.1 Fase de Análisis

En esta primera fase se pretende adquirir los conocimientos necesarios para un desarrollo adecuado de este Trabajo Fin de Grado:

- Estudio del estado actual de la infraestructura de redes móviles en España y datos disponibles.
- Documentación y estudio de índices y contaminantes relevantes en la contaminación aérea exterior.

- Familiarización con el lenguaje de programación Python y diferentes librerías para gestión de datos geoespaciales, usado para la inserción de datos en la base de datos.
- Solvencia en el manejo de los lenguajes de programación empleados en desarrollo web tales como HTML (*HyperText Markup Language*), CSS (*Cascading Style Sheets*), PHP (*Hypertext Preprocessor*) y Javascript, así como librerías para añadir funcionalidades.
- Exploración del lenguaje de programación SQL (*Structured Query Language*) y el gestor de bases de datos relacionales PostgreSQL, en especial su extensión PostGIS que permite realizar operaciones geoespaciales.

1.3.2 Fase de Implementación

Durante esta fase se llevará a cabo el diseño de la aplicación y las herramientas a emplear, así como la configuración del servidor web y del servidor de base de datos.

Posteriormente, se procederá con el desarrollo de la aplicación, en especial el apartado del mapa usando librerías de JavaScript.

Estas tareas tienen como objetivo construir una plataforma funcional que permita la recogida, almacenamiento y visualización de datos de manera eficiente y accesible. La implementación se centra en integrar los distintos componentes del sistema, desde la captura de información hasta su representación visual, asegurando que trabajen de forma coordinada y que respondan a las necesidades del proyecto. Esta fase es clave para transformar las ideas planteadas en el análisis previo en una solución operativa, que sirva como base para las pruebas y validaciones posteriores.

1.3.3 Fase de Pruebas

En esta última fase, que se ejecutó de manera iterativa durante el desarrollo, se llevarán a cabo diversas pruebas para la validación integral del sistema desarrollado, mediante escenarios de prueba específicos que evalúan tanto la funcionalidad como el rendimiento de la plataforma descrita, cuyo nombre es *RurAirConnect*.

Se realizaron pruebas de integración de datos y validación geográfica de datos, rendimiento de consultas geoespaciales, eficiencia del sistema de cacheo y validación de visualizaciones con conexiones HTTPS (*Hypertext Transfer Protocol Secure*).

1.4 Estructura de la Memoria del TFG

El Capítulo 2 contextualiza el proyecto realizando una revisión de los conceptos claves relacionados con la ciencia ciudadana, el proyecto *RurAirConnect*, la cobertura móvil en entornos rurales, la problemática de la contaminación ambiental y el uso de sensores portátiles para obtener medidas. Asimismo, se describen las tecnologías y herramientas software empleadas en el desarrollo de la plataforma.

En el Capítulo 3 describe la arquitectura general de la plataforma *RurAirConnect*, y el proceso de captura de datos, desde la obtención inicial de la información por los usuarios hasta su procesamiento e incorporación a la base de datos.

En el Capítulo 4 se detallan los componentes de la interfaz web desarrollada, que incluye la página de inicio, las explicaciones para la correcta toma de medidas, el formulario de recogida de datos, el mapa interactivo y los apartados de visualización de resultados. A continuación, se describe la base de datos empleada, con el fin de contextualizar los campos gestionados en la plataforma y su relación con los datos mostrados en la web. Finalmente, se exponen las principales limitaciones observadas tanto en el sistema como en la metodología aplicada durante el proceso de desarrollo y validación.

El Capítulo 5 recoge las conclusiones generales de este Trabajo Fin de Grado y las líneas futuras y evolución del sistema, tanto desde un punto de vista técnico como funcional.

Por último, en el Capítulo 6 se encuentran las referencias bibliográficas que han servido de apoyo para la realización de este trabajo.

2

Marco teórico

2.1 Introducción

Este capítulo presenta los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan el desarrollo del proyecto, integrando enfoques de participación ciudadana, telecomunicaciones y monitorización ambiental.

Se comienza con una aproximación a la ciencia ciudadana como metodología que transforma la relación entre la sociedad y la investigación científica. Se analizan sus principios, evolución y potencial para generar conocimiento colectivo a través de una participación activa de la ciudadanía.

A continuación, se describe el proyecto *RurAirConnect*, detallando sus objetivos, enfoque colaborativo y contribución al estudio de la cobertura móvil y la calidad del aire en zonas con baja densidad poblacional.

El siguiente apartado aborda los aspectos técnicos relacionados con la cobertura móvil, centrándose en las redes 4G y 5G. Se explican los parámetros clave para su evaluación y los retos específicos que presentan en entornos rurales.

También se examina la problemática de la contaminación atmosférica, con especial atención a los principales contaminantes, su impacto en la salud y el medio ambiente, y la importancia de contar con datos distribuidos en el territorio.

Por último, se detallan las tecnologías y herramientas software utilizadas en el desarrollo de la aplicación web, incluyendo lenguajes de programación.

2.2 Introducción a la Ciencia Ciudadana

La ciencia ciudadana se ha convertido en las últimas décadas en un fenómeno de creciente importancia dentro de la investigación científica y la innovación social. De manera general, puede definirse como la participación activa de personas no profesionales de la ciencia en procesos de investigación, contribuyendo a la formulación de preguntas, recolección y análisis de datos, interpretación de resultados y, en algunos casos, en la difusión del conocimiento generado [1]. En este sentido, rompe con la visión tradicional de la ciencia como una actividad exclusiva de especialistas, apostando por un modelo más inclusivo y participativo, en el que la ciudadanía adquiere un papel protagonista.

Desde la perspectiva de la ciencia abierta, la ciencia ciudadana se entiende como un motor de transformación que acerca la investigación a la sociedad, favoreciendo la transparencia, el acceso a los datos y la democratización del conocimiento [2].

La Figura 1 muestra cómo la ciencia ciudadana y la ciencia abierta comparten principios como la accesibilidad y la transparencia. Esta relación refuerza la idea de una investigación más inclusiva, donde la población participa activamente en la generación de conocimiento y la investigación generada tiene mayor relevancia social.

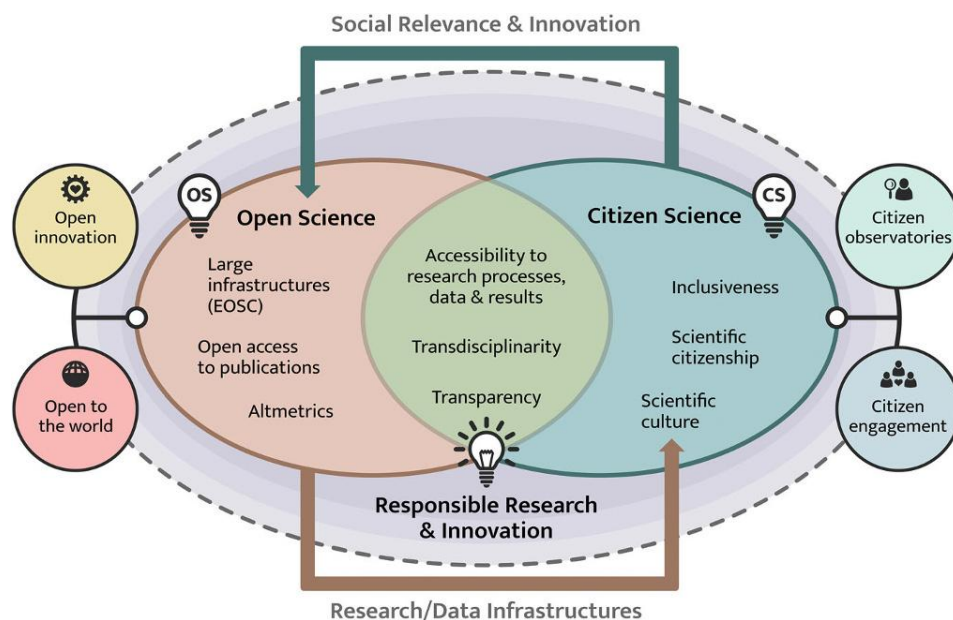


Figura 1: Relación entre ciencia ciudadana y Ciencia Abierta. Fuente [2]

Esta apertura no solo amplía la escala y la diversidad de los datos obtenidos, sino que también fortalece la legitimidad social de la ciencia al integrar voces y experiencias diversas en la producción de conocimiento.

La aportación de la ciencia ciudadana a la investigación científica no solo se limita únicamente a la recolección de datos. Tal como se observa en la Figura 2, los ciudadanos pueden intervenir en diversas etapas, desde las más tempranas como la formulación de hipótesis, hasta fases posteriores como el análisis e interpretación de resultados. Es una redefinición del flujo tradicional de conocimiento que integra un modelo colaborativo que promueve la interacción directa entre expertos y ciudadanía.

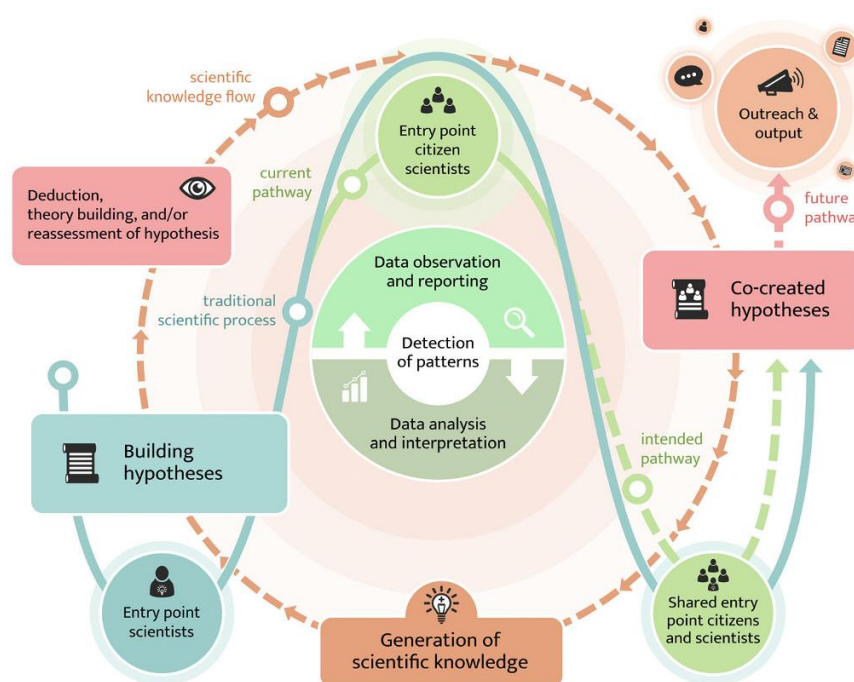


Figura 2: Integración de la Ciencia Ciudadana en el proceso de generación de conocimiento científico. Fuente [2]

Un aspecto clave en la expansión reciente de la ciencia ciudadana ha sido el desarrollo tecnológico, en particular el auge de los dispositivos móviles y las aplicaciones digitales. Los smartphones, equipados con sensores cada vez más precisos, han facilitado que los ciudadanos recopilen información de manera masiva, georreferenciada y en tiempo real. Según un estudio publicado en *Nature Humanities and Social Sciences Communications* [3], estas plataformas constituyen auténticas “ágoras digitales contemporáneas”, espacios donde se construyen comunidades de práctica en torno a la

ciencia, reforzando la interacción entre individuos, instituciones y el conocimiento colectivo.

En el ámbito ambiental, la ciencia ciudadana se presenta como una estrategia especialmente valiosa para hacer frente a los grandes retos del siglo XXI, como el cambio climático, la contaminación del aire, la pérdida de biodiversidad o la degradación de los ecosistemas. Según publican Fritz S et al. en *Frontiers in Environmental Science* [4], la recopilación de datos distribuidos en espacio y tiempo por parte de voluntarios constituye un recurso imprescindible para complementar los esfuerzos institucionales, que suelen estar limitados en alcance y financiación. De esta manera, la ciencia ciudadana ofrece la posibilidad de generar bases de datos masivas y de alta resolución, imposibles de conseguir únicamente mediante infraestructuras oficiales.

Más allá de su dimensión científica, la ciencia ciudadana también cumple una función social y comunitaria. Proyectos documentados por la *Citizen Science Association* destacan su potencial para empoderar a las comunidades, fortalecer la confianza en la ciencia y fomentar una participación ciudadana más activa en la toma de decisiones públicas [5]. En este sentido, la implicación en proyectos de monitorización ambiental o de salud pública no solo produce información útil, sino que también contribuye a aumentar la conciencia social sobre problemas comunes y a promover soluciones colectivas.

La dimensión educativa es otro de los pilares fundamentales de la ciencia ciudadana. Como señalan Roche et al. [6], estos proyectos tienen un impacto significativo en la educación tanto formal como informal, al permitir que los participantes se involucren en procesos científicos reales. La participación en actividades de ciencia ciudadana fomenta el pensamiento crítico, la alfabetización científica y el aprendizaje basado en la experiencia. En el caso de los estudiantes preuniversitarios, este enfoque resulta especialmente relevante: los introduce tempranamente en el método científico, despierta el interés por disciplinas STEM y muestra que la ciencia no es un ámbito inaccesible, sino una práctica social en la que cualquier persona puede contribuir de manera significativa.

En el contexto del presente TFG, la ciencia ciudadana no solo proporciona un marco metodológico para la recolección colaborativa de datos sobre cobertura móvil y calidad del aire en zonas rurales, sino que también asegura que la población local participe activamente en el proceso. Esta participación no solo enriquece la calidad y

representatividad de los datos recogidos, sino que además fortalece el vínculo entre ciencia, sociedad y educación, contribuyendo a que los resultados del proyecto tengan un impacto social real y duradero.

2.3 Proyecto de Ciencia *RurAirConnect*

RurAirConnect es un proyecto de ciencia ciudadana con el que se pretende mejorar no solo la calidad de vida en las zonas rurales, sino también contribuir a reducir brechas históricas vinculadas a la conectividad y a la salud ambiental. Todo ello haciendo participe a la ciudadanía a través de la investigación.

La desigualdad en términos de conectividad en estas áreas, especialmente en la zona comúnmente denominada la “España vaciada”, plantea una problemática vigente. Son territorios donde, con frecuencia, no solo se encuentran aislados o discriminados en términos de servicios básicos como transporte, sanidad o educación, sino que también sufren una exclusión digital que limita su desarrollo económico, social y cultural; percibiéndose a su vez en términos de conectividad y salud ambiental. Esta situación se puede denominar una marginalidad digital, en la que la falta de acceso a Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) acaba convirtiendo esta desigualdad tecnológica en una forma de exclusión social. A este fenómeno se le suma la disparidad económica que puede incrementar esta brecha digital [7].

Con este proyecto se busca contribuir a paliar dicha desigualdad y ofrecer un espacio que favorezca tanto la toma de conciencia como la divulgación de información y el apoyo a la población de las zonas rurales. El núcleo del proyecto se centra en el diseño y programación de una aplicación web, desarrollada en el marco de esta iniciativa, que invita tanto a estudiantes como a cualquier persona interesada a participar activamente en la recolección de datos sobre la cobertura de redes móviles 4G y 5G y los niveles de contaminación ambiental en zonas rurales.

Se pretende que, mediante herramientas accesibles desde dispositivos móviles, los participantes puedan registrar información de campo que se carga automáticamente en la plataforma. Estos datos alimentan un sistema de visualización que genera mapas interactivos y actualizados sobre conectividad y calidad del aire. La aplicación permite construir una base de datos colectiva y dinámica que refleje las condiciones reales de estos territorios, facilitando así la toma de decisiones informadas.

El enfoque participativo del proyecto es clave. Al involucrar directamente a la ciudadanía en la recolección y análisis de datos, se fomenta una cultura científica inclusiva y se rompe con la tradicional separación entre expertos y población. Este enfoque se enmarca en las corrientes contemporáneas de ciencia abierta y ciencia ciudadana, que promueven la democratización del conocimiento y el acceso libre a la información.

Este proyecto busca conectar a la ciudadanía con la investigación científica de manera sencilla, al tiempo que ofrece información útil y veraz, especialmente para las zonas rurales. En este sentido, se alinea con los objetivos de la ONU, que considera la conectividad como un factor crucial para el desarrollo sostenible de los países. Ya en 2016, el Consejo de Derechos Humanos de Naciones Unidas aprobó una resolución en la que instaba a los Estados a “promover y facilitar el acceso a Internet” como medio de garantizar derechos fundamentales también en el entorno digital [8]. Posteriormente, durante la pandemia de COVID-19, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) reforzó esta visión al señalar que la crisis sanitaria evidenció que “la conectividad digital es esencial para la resiliencia social y económica” [9].

De igual manera, este proyecto también cobra sentido desde una perspectiva institucional ya que el proyecto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, especialmente con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).

Con esta herramienta, dicha realidad puede estar un paso más cerca, ya que contribuirá a la concienciación y al acercamiento en tiempo real a la conectividad, o a la falta de ella, en áreas rurales. De este modo, *RurAirConnect* no solo promueve el aprendizaje y el compromiso social, sino que convierte a la ciudadanía en protagonista del cambio, generando conocimiento útil para mejorar la calidad de vida en zonas rurales y reducir brechas históricas en conectividad y salud ambiental.

En definitiva, *RurAirConnect* representa una apuesta por la innovación social y tecnológica al servicio de los territorios olvidados. Su enfoque integrador, participativo y orientado al bien común lo convierte en un ejemplo de cómo la ciencia ciudadana puede ser una herramienta poderosa para transformar realidades y construir un futuro más equitativo y sostenible.

2.4 Cobertura Móvil 4G/5G

Las tecnologías de comunicaciones móviles han experimentado una evolución constante desde sus inicios, dando lugar a sucesivas generaciones. En la actualidad, las más extendidas y relevantes son las generaciones 4G (LTE, *Long Term Evolution*) y 5G, cuya aplicabilidad en proyectos de monitorización ambiental y ciencia ciudadana justifica su elección como elemento de estudio en este trabajo.

La tecnología 4G, comercializada desde principios de la década de 2010, supuso un salto cualitativo importante respecto a las generaciones anteriores, proporcionando velocidades de descarga de hasta 100 Mbps en condiciones de baja movilidad, es decir, en entornos donde el usuario no se desplaza a gran velocidad, y estableciendo las bases para aplicaciones de datos intensivas [10]. En cuanto a 5G, representa la última generación de comunicaciones móviles, cuyo despliegue comercial en España se inició en 2019 [11].

Desde un punto de vista técnico, tanto 4G como 5G se basan en arquitecturas de red celulares compuestas por estaciones base (eNodeB en 4G, gNodeB en 5G), que se comunican con los dispositivos móviles mediante ondas electromagnéticas. Estas estaciones están conectadas a una red troncal que gestiona el tráfico de datos, la autenticación y la movilidad del usuario. En 5G, esta arquitectura se ha rediseñado para ser más flexible y escalable, incorporando tecnologías como el *slicing de red*, que permite crear redes virtuales adaptadas a diferentes necesidades de servicio [11] [12].

Las diferencias de rendimiento entre ambas tecnologías son notables. En la práctica, 4G alcanza velocidades de descarga típicas entre 15-25 Mbps, con máximos teóricos de 100 Mbps (alta movilidad) y 1 Gbps (baja movilidad) [10]. 5G, en cambio, puede ser hasta 100 veces más rápida, con capacidades teóricas de 20 Gbps, aunque en entornos urbanos reales se mueve en el rango entre 100 Mbps y 1 Gbps [11]. El aspecto más llamativo para aplicaciones en tiempo real es la latencia. En este aspecto, 4G oscila entre 30 y 50 milisegundos, mientras que 5G puede reducir este valor hasta apenas 1 milisegundo en condiciones óptimas. Esta mejora se debe principalmente a la descentralización de funciones mediante *edge computing*, que procesa los datos más cerca del usuario final [12].

En términos de capacidad de conexión, 5G mejora significativamente la cantidad de dispositivos que pueden conectarse simultáneamente. Mientras que 4G puede soportar

aproximadamente 2.000 dispositivos por kilómetro cuadrado, 5G amplía esta capacidad hasta 1 millón de dispositivos por kilómetro cuadrado. Esta mejora facilita sustancialmente el despliegue masivo de sensores y dispositivos IoT, uno de los puntos más fuertes de esta tecnología [12].

El despliegue de 5G utiliza múltiples bandas de frecuencia con características diferentes: las bandas bajas (por debajo de 1GHz) proporcionan amplia cobertura pero velocidades moderadas, siendo especialmente útiles en zonas rurales; las bandas medias (entre 1 y 6 GHz) ofrecen un mejor balance entre cobertura y velocidad, siendo la banda 3,5 GHz la prioritaria en Europa; y las bandas altas o mmWave (desde 24 hasta 100 GHz) permiten velocidades máximas pero con cobertura muy limitada y de corto alcance, usadas principalmente para entornos urbanos densos [12].

La elección de bandas de frecuencia tiene implicaciones directas en la intensidad de señal medida en dBm. Las bandas altas, como mmWave, ofrecen velocidades superiores, pero son más sensibles a la atenuación por obstáculos físicos y condiciones atmosféricas, lo que puede generar variaciones significativas en la señal en entornos rurales [13].

El estado actual de la cobertura móvil en España muestra un nivel de madurez elevado para la tecnología 4G. Según el Informe de Cobertura de Banda Ancha 2023 del Gobierno de España publicado en 2024, la cobertura 4G alcanza al 99,62% de la población española, estableciendo una base sólida para servicios de datos móviles en prácticamente todo el territorio nacional [14].

Por otro lado, el despliegue de 5G en España ha mostrado un crecimiento notable en los últimos años. Los datos oficiales más recientes indican que la cobertura 5G alcanza aproximadamente al 92% de la población nacional, con objetivos gubernamentales de llegar al 96% a lo largo de 2025 [15]. En tan solo tres años (2022-2024), la cobertura 5G ha crecido más de 30 puntos porcentuales. La banda europea prioritaria cubre ya el 58,1% del territorio [15].

Un punto clave para proyectos como *RurAirConnect* es la situación en zonas rurales. Los municipios de menos de 10.000 habitantes aún presentan carencias notables en 4G, especialmente para velocidades mínimas de 50 Mbps [14]. Esta situación es particularmente visible en regiones como el norte de Castilla y León o las zonas

montañosas de esta Comunidad Autónoma, donde la baja densidad poblacional y la orografía compleja dificultan el despliegue.

Sin embargo, los datos recientes muestran una evolución positiva en este ámbito: la cobertura 5G en zonas rurales ha experimentado un crecimiento significativo, alcanzando aproximadamente al 70% de la población rural según fuentes técnicas especializadas, con proyecciones gubernamentales que apuntan a alcanzar el 80% (8 de cada 10 personas) en el corto plazo [15]. Este crecimiento representa unos de los incrementos más importantes en infraestructuras de telecomunicaciones en áreas rurales de los últimos años en España.

El Gobierno de España ha implementado diversas iniciativas para mejorar la cobertura móvil, destacando el Programa UNICO 5G Redes Activas 2024 como parte del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Este programa se enfoca específicamente en el despliegue de tecnología 5G en zonas rurales. El programa establece 50 zonas de concurrencia correspondientes a las provincias españolas, se centra en municipios de menos de 10.000 habitantes y prioriza áreas que no hayan recibido ayudas previas para despliegue de infraestructuras móviles [16].

Según las proyecciones oficiales, se espera alcanzar una cobertura ultrarrápida del 100% de la población en 2025. En zonas rurales se proyecta alcanzar el 89,5% de cobertura, lo que representaría un aumento de más de 50 puntos respecto a los niveles de 2018 (38%) [15].

Para evaluar con mayor precisión el alcance real de estas iniciativas, resulta fundamental considerar parámetros técnicos como la intensidad de señal móvil, medida en dBm. Esta métrica indica la potencia de la señal recibida por el dispositivo móvil y determina directamente la calidad de la conexión y la capacidad del dispositivo para mantener una comunicación estable con la estación base.

Según guías prácticas, los valores típicos de intensidad de señal oscilan entre -50 dBm (señal excelente) y -120 dBm (señal muy débil o sin servicio). Generalmente se considera -70 dBm como el umbral para una señal buena, -85 dBm para una señal aceptable, y valores por debajo de -100 dBm son indicativos de cobertura deficiente [17].

La medición en dBm permite una evaluación más precisa y objetiva de la cobertura móvil que los mapas oficiales, que suelen basarse en estimaciones teóricas. En proyectos como *RurAirConnect*, esta métrica se convierte en una herramienta clave para identificar zonas de sombra, validar la calidad de la infraestructura existente y correlacionar la conectividad con otros factores ambientales como la contaminación atmosférica.

La intensidad de señal en dBm varía significativamente según múltiples factores ambientales y técnicos documentados en la bibliografía especializada. La distancia a la estación base es el factor más determinante, ya que la señal se atenúa con la distancia siguiendo la ley del cuadrado inverso [18]. Los obstáculos físicos como edificios, montañas, árboles y otros elementos del terreno pueden causar atenuación, reflexión y difracción de la señal, reduciendo considerablemente su intensidad.

Las condiciones meteorológicas también influyen, especialmente en frecuencias altas como las utilizadas por 5G, donde la lluvia, niebla y humedad atmosférica pueden causar atenuación adicional. Pero además la orografía en el terreno es particularmente relevante en zonas rurales, donde valles, colinas y accidentes geográficos pueden crear zonas de sombra con cobertura deficiente [13].

En el contexto del proyecto *RurAirConnect*, la medición de la intensidad de señal en dBm adquiere una importancia especial como indicador de la calidad de las comunicaciones móviles en entornos rurales de Castilla y León. Esta medición permite identificar zonas con cobertura deficiente, evaluar la variabilidad espacial de la cobertura móvil, correlacionar la intensidad de señal con otros parámetros ambientales monitorizados, y proporcionar información valiosa sobre la infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales.

La recopilación sistemática de datos de intensidad de señal a través de dispositivos móviles distribuidos geográficamente permite crear mapas de cobertura detallados y actualizados. Estos mapas pueden complementar los mapas oficiales proporcionados por operadores y administraciones públicas.

Además, estos mapas empíricos permiten detectar discrepancias entre la cobertura teórica anunciada por los operadores y la cobertura real experimentada por los usuarios. En zonas rurales, donde la infraestructura es más escasa y las condiciones geográficas más complejas, esta diferencia puede ser significativa.

La participación de usuarios locales en la recogida de datos se convierte en una herramienta poderosa para democratizar el acceso a información sobre conectividad. Este enfoque de ciencia ciudadana puede contribuir a políticas públicas basadas en evidencia empírica, permitiendo que los investigadores accedan a datos distribuidos espacialmente que serían muy difíciles de obtener mediante métodos tradicionales, especialmente en zonas rurales extensas como Castilla y León [3].

Las mediciones de intensidad de señal en dBm pueden revelar patrones espaciales y temporales significativos, ya que, por ejemplo, en áreas rurales es común encontrar variaciones abruptas en la intensidad de señal debido a la menor densidad de estaciones base y la mayor influencia de obstáculos naturales. Estas variaciones pueden seguir patrones relacionados con la topografía, la vegetación estacional, las condiciones meteorológicas y las características específicas del despliegue de infraestructura de cada operador móvil [13]. La documentación de estos patrones contribuye al conocimiento científico sobre la cobertura móvil real en entornos rurales y puede informar decisiones de política pública sobre mejora de infraestructuras de telecomunicaciones [14] [15].

2.5 Contaminación ambiental y sensores portátiles

La contaminación atmosférica es una de las cuestiones más tratadas en el tema del medio ambiente y su conservación, y posee gran relevancia para la vida cotidiana en las ciudades y zonas industriales, donde las emisiones son más elevadas. El término hace referencia a la presencia de compuestos que alteran la composición química de la atmósfera terrestre. Estas partículas presentan un peligro para la salud de los receptores, es decir, los seres vivos que respiran en el entorno contaminado, y pueden resultar en el deterioro de muchos materiales expuestos al ambiente. Los contaminantes provienen de los focos emisores, los cuales pueden ser naturales o relacionados con la actividad humana, siendo los más problemáticos la producción industrial y el transporte.

Las emisiones se rigen por legislación y se miden con sensores, todo ello con el objetivo de controlar la difusión de los contaminantes desde los focos. Sin embargo, también se hace un seguimiento y una regulación exhaustivos de la inmisión, es decir, de la concentración de estos compuestos en la capa límite donde se encuentran los receptores, y son estas medidas las que determinan la calidad del aire, de la que se habla más adelante.

Los contaminantes con la evidencia más sólida de preocupación para la salud pública incluyen material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂). Estos contaminantes pueden tener origen natural o antropogénico, siendo estos últimos los de mayor preocupación debido a su creciente concentración en las últimas décadas, especialmente en áreas urbanas e industriales [19].

2.5.1 Definición de contaminantes atmosféricos principales

A continuación, se van a definir los principales contaminantes atmosféricos existentes y cuáles vamos a tener en cuenta en nuestro proyecto. Para ello se ha empleado el glosario de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) y ampliado algunos conceptos [20]:

- **Material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀):** Según la EPA, el material particulado en suspensión no es un solo contaminante, sino una mezcla compleja de sólidos y aerosoles compuesta por pequeñas gotitas de líquido, fragmentos sólidos secos y núcleos sólidos con recubrimientos líquidos. Las partículas PM_{2.5} tienen diámetros aerodinámicos inferiores a 2.5 micrómetros y pueden penetrar hasta los alveolos pulmonares, mientras que las PM₁₀ (< 10 µm) se depositan principalmente en las vías respiratorias superiores. Su composición incluye iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y elementos de la corteza terrestre. [21]
- **Dióxido de nitrógeno (NO₂):** Gas altamente reactivo que se forma principalmente como subproducto de los procesos de combustión a alta temperatura, especialmente en vehículos y plantas de energía [21].
- **Ozono troposférico (O₃):** Contaminante secundario que no se emite directamente, sino que se forma en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de radiación solar [21]. A diferencia del ozono estratosférico beneficioso, el ozono troposférico es un potente oxidante que causa irritación de las vías respiratorias y daños a la vegetación [19].
- **Dióxido de azufre (SO₂):** Gas incoloro con olor penetrante que se origina principalmente por la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre, como carbón y petróleo pesado [19]. La exposición a corto plazo al SO₂ puede dañar el

sistema respiratorio humano tanto directamente como a través de la formación de material particulado pequeño conocido como PM2.5.

- Monóxido de carbono (CO): Gas incoloro e inodoro producido por la combustión incompleta de materiales que contienen carbono. Su peligrosidad radica en su capacidad para unirse a la hemoglobina con una afinidad 200 veces mayor que el oxígeno, formando carboxihemoglobina y reduciendo la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre [19].

2.5.2 Índices de calidad del aire

Para la evaluación y comunicación de la calidad del aire a la población, se han desarrollado diversos índices estandarizados que transforman las concentraciones de contaminantes en valores categóricos más comprensibles. Los dos sistemas más relevantes a nivel internacional son el Índice de Calidad del Aire (ICA) europeo y el *Air Quality Index* (AQI) estadounidense. A continuación, se pasa a detallar cada uno de ellos con mayor nivel de detalle.

Índice de Calidad del Aire Español (ICA)

En España, el Índice Nacional de Calidad del Aire se rige por la Orden TEC/351/2019, modificada posteriormente por resolución del Director General de Calidad y Evaluación Ambiental. El ICA define 6 categorías cromáticas de calidad del aire: buena (azul cian), razonablemente buena (verde), regular (amarillo), desfavorable (naranja), muy desfavorable (rojo), y extremadamente desfavorable (morado) [22].

La categorización de la calidad del aire se basa en cinco contaminantes clave que dañan la salud de las personas y el medio ambiente: material particulado (tanto PM2.5 como PM10), ozono a nivel del suelo, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. A cada estación se le asigna la peor categoría en términos de calidad del aire de cualquiera de los contaminantes evaluados [22].

La tabla resumen con la información anterior se encuentran a continuación (Tabla 1). La primera es la publicada en el BOE, cuyos datos están todos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

SO ₂		PM _{2,5}		PM ₁₀		O ₃		NO ₂		CATEGORÍA DEL ÍNDICE
0	100	0	10	0	20	0	50	0	40	BUENA
101	200	11	20	21	40	51	100	41	90	RAZONABLEMENTE BUENA
201	350	21	25	41	50	101	130	91	120	REGULAR
351	500	26	50	51	100	131	240	121	230	DESFAVORABLE
501	750	51	75	101	150	241	380	231	340	MUY DESFAVORABLE
751-1250		76-800		151-1200		381-800		341-1000		EXTREMADAMENTE DESFAVORABLE

Tabla 1. Bandas y concentraciones definidas en el ICA [22]

El proceso de cálculo sigue estos pasos: se obtienen las concentraciones usando valores horarios o promedios específicos según el contaminante (24h para PM₁₀ y PM_{2.5}, 1h para NO₂ y SO₂, máximo diario de 8h para O₃), cada concentración se clasifica en una de las seis categorías establecidas con rangos específicos para cada contaminante, se selecciona la categoría más desfavorable entre todos los contaminantes de la estación, y finalmente se comunica mediante el código de colores estandarizado [22]. Esta aproximación categórica facilita la comunicación al público general, aunque no proporciona valores numéricos específicos como otros sistemas de indexación.

Air Quality Index Estadounidense (AQI)

La EPA ha establecido Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente para seis contaminantes criterio: dióxido de azufre (SO₂), material particulado (PM_{2.5}/PM₁₀), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y plomo (Pb) [3]. El AQI utiliza una escala numérica continua de 0 a 500, dividida en seis categorías: "Good" (0-50), "Moderate" (51-100), "Unhealthy for Sensitive Groups" (101-150), "Unhealthy" (151-200), "Very Unhealthy" (201-300), y "Hazardous" (301-500) [23].

El cálculo del AQI se basa en una transformación lineal por tramos mediante la siguiente fórmula:

$$AQI = [(I_{Hi} - I_{Lo}) / (C_{Hi} - C_{Lo})] \times (C - C_{Lo}) + I_{Lo}$$

Donde AQI es el valor del índice calculado, C es la concentración medida del contaminante, CHi y CLo son los puntos de ruptura de concentración que enmarcan a C, e IHi e ILo son los valores de índice correspondientes. El proceso incluye: selección del promedio temporal apropiado para cada contaminante, identificación de los puntos de ruptura en las tablas específicas, aplicación de la transformación lineal, selección del AQI dominante si se miden múltiples contaminantes, y redondeo al entero más próximo [23]. Esta metodología permite representación numérica precisa y facilita comparaciones cuantitativas entre ubicaciones y períodos.

Los valores necesarios para aplicar la fórmula del AQI, es decir, los puntos de ruptura de concentración y sus equivalentes en el índice, se extraen de tablas oficiales como la Tabla 2. Esta tabla organiza los rangos de concentración de distintos contaminantes según su promedio temporal, y los vincula con los tramos del índice y su correspondiente categoría de calidad del aire. De este modo, permite ubicar rápidamente la concentración medida dentro del intervalo adecuado y aplicar la transformación lineal con precisión. Además, al incluir varios contaminantes en paralelo, facilita la comparación entre ellos y la identificación del AQI dominante en cada caso, lo que resulta especialmente útil en contextos de evaluación ambiental con múltiples fuentes de emisión.

Consideraciones							AQI	Categoría
O ₃ (ppm) 8 h	O ₃ (ppm) 1 h	PM _{2.5} (µg/m ³) 24 h	PM ₁₀ (µg/m ³) 24 h	CO (ppm) 8 h	SO ₂ (ppb) 1 h	NO ₂ (ppb) 1 h	AQI	
0.000 - 0.054	-	0.0 – 9.0	0 - 54	0.0 - 4.4	0 - 35	0 - 53	0 - 50	Buena
0.055 - 0.070	-	9.1 – 35.4	55 - 154	4.5 - 9.4	36 - 75	54 - 100	51 - 100	Razonablemente buena
0.071 - 0.085	0.125 - 0.164	35.5 – 55.4	155 - 254	9.5 - 12.4	76 - 185	101 - 360	101 - 150	Regular
0.086 - 0.105	0.165 - 0.204	(55.5 - 125.4)	255 - 354	12.5 - 15.4	186 - 304	361 - 649	151 - 200	Desfavorable
0.106 - 0.200	0.205 - 0.404	(125.5 - 225.4)	355 - 424	15.5 - 30.4	305 - 604	650 - 1249	201 - 300	Muy desfavorable
0.201+	0.405+	225.5+	425+	30.5+	605+	1250+	301+	Extremadamente desfavorable

Tabla 2. Rangos de referencia del AQI estadounidense por contaminante y categoría de calidad del aire. Fuente [23]

2.5.3 Instrumentación tradicional para la medición de calidad del aire

La medición oficial de la calidad del aire se realiza mediante estaciones de monitorización equipadas con instrumentos de referencia que cumplen estrictos requisitos de precisión, exactitud y trazabilidad metrológica establecidos por las directivas europeas [24] y organismos internacionales como la EPA [25]. Para material particulado, los dispositivos de medición gravimétricos constituyen el método de referencia según la normativa europea EN 12341, aspirando aire a caudal constante a través de cabezales que separan partículas por tamaño, captándolas en filtros preconditionados y calculando concentraciones por pesado diferencial tras 24 horas [26]. Los instrumentos de medida TEOM-FDMS proporcionan mediciones continuas mediante osciladores piezoeléctricos que detectan cambios de frecuencia proporcionales a la masa acumulada, mientras que los sensores de atenuación beta cuantifican partículas por absorción de radiación [27] [28].

Para gases contaminantes, los analizadores de ozono emplean absorción UV a 254 nm según estándares de referencia, los de NO₂ utilizan quimioluminiscencia mediante reacción con ozono y detección de radiación emitida, los de SO₂ se basan en fluorescencia UV con excitación y medición en bandas específicas, y los de CO usan espectroscopia infrarroja no dispersiva (NDIR) aprovechando la absorción específica en bandas infrarrojas. Las estaciones requieren además sistemas de acondicionamiento de muestra con líneas calefactadas y filtros, sistemas automáticos de calibración con gases patrón certificados, equipos meteorológicos para temperatura, humedad, viento y radiación solar, y sistemas de comunicación y transmisión remota [28].

Esta instrumentación presenta limitaciones significativas para aplicaciones de ciencia ciudadana: costes muy elevados por equipo, complejidad operativa al requerir mantenimiento especializado y calibraciones periódicas, naturaleza estacionaria que impide estudios de movilidad y tiempos de respuesta largos incompatibles con mediciones dinámicas. Por todo ello, en este TFG se analizan otras alternativas menos costosas.

2.5.4 Sensores de medición de calidad del aire de bajo coste

Como alternativa a la instrumentación tradicional, han surgido dos enfoques principales para la monitorización de calidad del aire de bajo coste: el desarrollo de sistemas basados en microcontroladores (como Arduino o ESP32) con sensores

individuales, y los sensores comerciales integrados. Ambos enfoques han experimentado un desarrollo acelerado en la última década, impulsado por los avances en microelectrónica, tecnologías MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*) y la proliferación del Internet de las Cosas (IoT) [11].

Los sistemas basados en microcontroladores ofrecen flexibilidad en la integración sensores específicos según el tipo de contaminante. Para partículas en suspensión (PM_{2.5}, PM₁₀), se emplean sensores ópticos que utilizan dispersión de luz láser para estimar concentraciones. Para gases contaminantes, se utilizan sensores electroquímicos que generan una señal eléctrica proporcional a la concentración del gas, sensores NDIR (infrarrojo no dispersivo) que detectan gases como CO₂ mediante absorción en bandas infrarrojas, y sensores que reaccionan ante compuestos orgánicos volátiles modificando su resistencia eléctrica [28].

Estos sistemas permiten personalización completa de parámetros de medición, protocolos de comunicación, y algoritmos de procesamiento de datos, con costes que oscilan entre 50–200 € por unidad dependiendo de la configuración de sensores.

Sin embargo, la implementación de sistemas basados en microcontroladores presenta desafíos: calibración específica por unidad, compensación ambiental, validación cruzada entre tecnologías, mantenimiento técnico y variabilidad entre unidades artesanales. Estas limitaciones han sido ampliamente documentadas en estudios como el de Castell et al. [29], que destaca errores típicos del 20-50% en algunas medidas, sensibilidad a humedad, deriva temporal e interferencias químicas.

Por estas razones, en el proyecto *RurAirConnect* se ha optado por emplear dispositivos de medición comerciales integrados que ofrecen soluciones plug-and-play específicamente diseñadas para uso no especializado como ya se ha realizado en otros estudios [29].

Estos dispositivos incorporan múltiples sensores en una sola unidad: sensores de material particulado por dispersión de luz láser para PM_{2.5} y PM₁₀, sensores electroquímicos o de óxido metálico para gases como formaldehído (HCHO) y compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC), sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR) para CO₂, y sensores ambientales para temperatura y humedad relativa. Además, muchos de estos elementos incluyen pantallas para visualización directa, conectividad WiFi para

transmisión de datos, algoritmos internos para cálculo automático de índices de calidad del aire, y envoltentes diseñadas para uso doméstico e institucional.

La ventaja principal de estos sistemas integrados radica en su facilidad de uso y despliegue inmediato, características especialmente valoradas en entornos educativos. Los instrumentos de medida comerciales incorporan algoritmos de compensación ambiental desarrollados por los fabricantes, procedimientos de calibración de fábrica, aunque limitados, y mayor estabilidad electrónica que reduce la variabilidad entre unidades. En el contexto de *RurAirConnect*, esto permite enfocar los esfuerzos en la recolección y análisis de datos en lugar de en el desarrollo y calibración de hardware especializado.

2.5.5 Metodología de medición y temporalidad

Las mediciones oficiales de calidad del aire se basan en promedios temporales extensos para minimizar la influencia de variaciones momentáneas y obtener valores representativos de la exposición poblacional. Según la normativa europea, se utilizan promedios anuales para evaluación de efectos crónicos, promedios diarios de 24 horas para PM₁₀ y PM_{2.5} en evaluación de efectos agudos, y promedios horarios para gases con efectos de corto plazo como 1 hora para NO₂ y 8 horas para O₃ [22] y CO [23].

Sin embargo, esta metodología presenta limitaciones para proyectos de ciencia ciudadana, donde los participantes realizan mediciones esporádicas y de corta duración debido a restricciones logísticas y de recursos. Por tanto, en el contexto de *RurAirConnect* se adopta un enfoque de mediciones puntuales con períodos de observación de varios minutos para permitir estabilización de lecturas y calibración básica. Aunque este enfoque introduce limitaciones en términos de representatividad temporal, se compensa con la ventaja de la densidad espacial de datos que proporciona la participación ciudadana masiva [29].

2.5.6 Parámetros implementados en RurAirConnect

Basándose en las capacidades de los instrumentos de medida integrados de bajo costo y los índices de referencia internacionales, la plataforma *RurAirConnect* implementa los siguientes parámetros de calidad del aire con sus respectivos umbrales de categorización:

- Material Particulado PM2.5: niveles de referencia de 0, 6, 16, 51, 91, 141, 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ basados en la Agencia Europea de Medio Ambiente y guías internacionales [20], relevante por su asociación con efectos cardiovasculares y respiratorios debido a su capacidad de penetración alveolar profunda [19].
- Material Particulado PM10: niveles de 0, 16, 46, 121, 196, 270, 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ según fuentes de referencia en calidad del aire, relacionado con irritación de vías respiratorias superiores y efectos respiratorios agudos [19].
- Monóxido de Carbono (CO): niveles de 0, 4.5, 9.5, 12.5, 15.5, 30.5, 40 ppm siguiendo el AQI estadounidense [23], crítico por su toxicidad al interferir con el transporte de oxígeno en la sangre [19].
- Dióxido de Carbono (CO2): aunque tradicionalmente no incluido en índices de calidad del aire por no considerarse tóxico a concentraciones ambientales típicas, se incorpora debido a su disponibilidad en dispositivos de medición comerciales, utilidad como indicador de ventilación y calidad de aire interior, y relevancia como principal gas de efecto invernadero antropogénico. Los niveles implementados de 0, 400, 600, 1000, 2000, 5000, 10000 ppm se basan en referencias técnicas y guías de medición de CO2 [30], reconociendo que no existe consenso internacional claro para umbrales de CO2 en aire exterior.

2.5.7 Consideraciones para la implementación en ciencia ciudadana

La implementación de instrumentos de medida de bajo costo en proyectos de ciencia ciudadana para la monitorización de calidad del aire presenta tanto oportunidades como desafíos que requieren consideración cuidadosa. Estos dispositivos no pueden reemplazar las redes oficiales de monitorización debido a limitaciones de precisión y trazabilidad, pero proporcionan información valiosa sobre variabilidad espacial de la contaminación, permitiendo detección de microambientes con calidad del aire diferenciada e identificación temprana de eventos de contaminación localizada [29].

La participación ciudadana activa en temas ambientales genera concienciación y compromiso comunitario, mientras que la densificación de la red de monitorización complementa las mediciones oficiales en áreas con escasa cobertura. Las limitaciones en términos de precisión y exactitud se abordan mediante estrategias de validación cruzada entre múltiples dispositivos, análisis estadístico de grandes volúmenes de datos

aprovechando la robustez que proporciona la participación masiva, y desarrollo de algoritmos de corrección basados en comparaciones con estaciones de referencia cuando estén disponibles [29].

El desarrollo detallado de estas estrategias de validación, los protocolos específicos de captura de datos mediante dispositivos de medición comerciales, y las técnicas de procesamiento y análisis de la información recolectada se abordan en profundidad en el Apartado 3.3 (dentro del Capítulo 3) del presente trabajo, donde se describe la arquitectura técnica completa del sistema *RurAirConnect*.

2.6 Tecnologías y herramientas software usadas

El desarrollo de la plataforma *RurAirConnect* ha requerido la integración de diversas tecnologías software que permiten abordar de forma eficaz el ciclo completo de gestión de datos: desde la captura en campo hasta su procesamiento, almacenamiento y visualización en la web. La elección de estas herramientas responde a criterios de accesibilidad, interoperabilidad, escalabilidad y sostenibilidad, con especial atención a la disponibilidad de soluciones de código abierto y a la simplicidad en el despliegue en un entorno universitario con recursos limitados.

2.6.1 Captura y procesamiento de datos

Para la captura de datos se ha utilizado Google Forms como interfaz principal. Esta herramienta proporciona una solución rápida y multiplataforma para la recolección estructurada de información, permitiendo a los usuarios participar mediante formularios accesibles desde dispositivos móviles u ordenadores [31].

No obstante, Google Forms presenta limitaciones en cuanto a la captura de datos geoespaciales, ya que no permite obtener coordenadas GPS de forma nativa. Para solventar esta carencia, se ha integrado Google Apps Script, una plataforma de automatización basada en JavaScript que extiende las funcionalidades de los formularios mediante scripts personalizados. En el contexto de *RurAirConnect*, Apps Script se ha utilizado para acceder a la ubicación del dispositivo en el momento del envío del formulario, capturar coordenadas GPS, validar campos obligatorios y automatizar el envío de datos a hojas de cálculo y sistemas externos [32] [33].

El procesamiento de datos se ha realizado con Python, un lenguaje ampliamente utilizado en ingeniería de datos por su versatilidad y su ecosistema de librerías. Se han desarrollado scripts que implementan flujos de tipo ETL (*Extract, Transform, Load*), permitiendo extraer datos desde Google Sheets, transformarlos mediante limpieza y normalización, y cargarlos en una base de datos relacional. Las librerías empleadas incluyen:

- Pandas y Geopandas, para manipulación de datos tabulares y geoespaciales [34] [35].
- Requests, para peticiones HTTP a APIs REST [36]-
- Psycopg2, para la conexión y ejecución de consultas en PostgreSQL [37].

2.6.2 Almacenamiento y base de datos

En cuanto al almacenamiento, se ha optado por PostgreSQL, un sistema de gestión de bases de datos relacional reconocido por su robustez y extensibilidad [38]. Sobre esta base se ha incorporado la extensión PostGIS, que añade soporte completo para datos geoespaciales, permitiendo almacenar puntos, líneas y polígonos, realizar consultas espaciales o transformar coordenadas [39].

El modelo de datos se ha diseñado siguiendo una estructura relacional normalizada, lo que garantiza integridad referencial, evita redundancias y facilita la escalabilidad. De este modo se representan distintos dominios de información (mediciones, operadores, ubicaciones, parámetros ambientales) manteniendo relaciones claras entre ellos y asegurando coherencia en los registros.

La base de datos está alojada en Supabase, plataforma *Backend-as-a-Service* (BaaS) de código abierto que ofrece una instancia gestionada de PostgreSQL. En este proyecto Supabase se ha empleado exclusivamente como servicio de base de datos, aprovechando su simplicidad y evitando la necesidad de desplegar un servidor propio en la infraestructura universitaria. La comunicación entre la base de datos y el sistema web se realiza mediante un *session pooler* que permite gestionar eficientemente las conexiones concurrentes [40].

El diseño detallado de la base de datos, incluyendo la descripción de tablas y relaciones, se desarrolla en el Capítulo 4.

2.6.3 Desarrollo y visualización web

La interfaz web de *RurAirConnect* se ha desarrollado con un stack tradicional compuesto por HTML5, CSS3, JavaScript estándar y PHP. La decisión de mantener un enfoque clásico responde a la búsqueda de soberanía tecnológica, es decir, garantizar que la aplicación pueda mantenerse sin dependencia de frameworks o servicios externos complejos. HTML5 proporciona estructura semántica; CSS3 permite interfaces responsive; JavaScript añade interactividad en el cliente; y PHP actúa como backend, sirviendo de intermediario entre el frontend y la base de datos alojada en Supabase. En este contexto, PHP centraliza la lógica de negocio, gestiona las consultas a la base de datos y expone una capa de servicios que protege el acceso directo a la BBDD.

Durante la fase de desarrollo local se ha utilizado XAMPP, un entorno que integra Apache y PHP. La elección se debe a su simplicidad en el despliegue y pruebas, dado que el componente de base de datos ya estaba cubierto por Supabase y no era necesario instalar ni configurar un servidor local adicional [41]. Para la visualización de datos, se han integrado las siguientes librerías especializadas:

- Chart.js, para generar gráficos interactivos de líneas y barras, aunque también permite áreas y dispersión [42].
- Leaflet.js, para la creación de mapas interactivos donde representar los puntos con información introducida por los usuarios, aunque dispone de soporte para capas vectoriales y raster, integración con mapas base y funciones avanzadas como clustering o capas de calor [43].
- Luxon.js, para la gestión de fechas y horas en formato y localización española a la hora de trabajar con ejes temporales con Chart.js [44].

La arquitectura resultante se caracteriza por ser simple, modular y plenamente soberana. En lugar de adoptar enfoques basados en microservicios o arquitecturas complejas en la nube, se ha priorizado un stack consolidado y tradicional, suficientemente potente para cubrir las necesidades del proyecto y fácilmente replicable en entornos similares.

3

Diseño de la arquitectura y obtención de datos

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el proceso de diseño e implementación de la plataforma *RurAirConnect*, desarrollada para facilitar la recogida, gestión y visualización de datos sobre cobertura móvil y calidad del aire en zonas rurales. La solución se ha concebido con un enfoque modular, accesible y adaptable a contextos con limitaciones tecnológicas, priorizando la participación ciudadana y el uso de herramientas de bajo coste.

Así pues, se presenta la arquitectura general de la plataforma, compuesta por distintos módulos que permiten la captura de datos, su almacenamiento estructurado y su posterior visualización. Esta arquitectura se basa en tecnologías abiertas y escalables, lo que facilita su mantenimiento y posible ampliación en futuras versiones.

Asimismo, se detalla el proceso de recogida de datos mediante dispositivos móviles y sensores ambientales portátiles. El usuario se desplaza por el entorno rural con su teléfono y el sensor, realizando mediciones geolocalizadas en distintos puntos. El acceso a la plataforma desde el dispositivo móvil permite registrar automáticamente los datos de geolocalización, garantizando trazabilidad y facilidad de uso en campo.

3.2 Arquitectura general de la plataforma RurAirConnect

La arquitectura de *RurAirConnect* ha sido concebida bajo un enfoque modular y pragmático. El diseño prioriza tres pilares fundamentales: simplicidad en el despliegue, soberanía tecnológica frente a dependencias externas, y facilidad de mantenimiento a largo plazo. Para ello, se ha adoptado una estructura de tres capas claramente diferenciadas:

captura de datos, procesamiento y almacenamiento, y presentación/visualización web. Cada una de ellas consta de funciones específicas y una interfaz bien definida que facilita la evolución independiente de sus componentes.

RurAirConnect se presenta como una plataforma integral para la gestión de datos ambientales georreferenciados, desde su recogida por parte de ciudadanos hasta su visualización interactiva en la web. La solución combina servicios gestionados en la nube con desarrollos propios, lo que permite equilibrar la agilidad de herramientas existentes con el control técnico necesario para adaptarse a los requisitos del proyecto. El diseño arquitectónico se apoya en cinco principios que guían todas las decisiones técnicas:

- Simplicidad operacional, que busca reducir la complejidad tanto en el despliegue como en el mantenimiento.
- Soberanía tecnológica, mediante la elección de herramientas que eviten dependencias con *frameworks* o servicios externos complejos.
- Escalabilidad gradual, que permite ampliar la capacidad del sistema sin necesidad de reestructuraciones profundas.
- Robustez ante conectividad variable, especialmente relevante en entornos rurales donde la conexión puede ser intermitente.
- Interoperabilidad, asegurando que los componentes puedan integrarse fácilmente con futuras soluciones o sistemas externos.

En las siguientes subsecciones se procede a explicar cada una de las capas y el flujo y comunicación entre las distintas capas.

3.2.1 Capa de captura de datos

La primera capa del sistema, dedicada a la recogida de información, se ha diseñado para ser accesible, ligera y tolerante a condiciones de conectividad adversas. Para ello, se ha optado por una solución basada en Google Forms, complementada con Google Apps Script [32]. Esta combinación permite ofrecer una interfaz universal, accesible desde cualquier dispositivo con navegador web, sin necesidad de instalar aplicaciones específicas.

Google Forms actúa como puerta de entrada para los datos, proporcionando un formulario responsive que facilita la introducción de mediciones ambientales por parte de

los usuarios. La integración con Apps Script amplía las capacidades del formulario, incorporando funcionalidades clave como la captura automática de coordenadas GPS, la validación en tiempo real de campos obligatorios y la automatización del envío de datos hacia el sistema de procesamiento.

Además de su facilidad de uso, esta capa destaca por su tolerancia a desconexiones temporales, ya que los formularios pueden completarse offline y sincronizarse posteriormente. Los datos recogidos se almacenan inicialmente en Google Sheets (hojas de cálculo online colaborativas) [45], que funciona como un buffer intermedio antes de su procesamiento definitivo, aprovechando la infraestructura escalable de Google Cloud para garantizar disponibilidad y rendimiento.

3.2.2 Capa de procesamiento y almacenamiento

La segunda capa de la arquitectura se encarga de transformar los datos capturados en información estructurada y validada, lista para su análisis y visualización. Este proceso se articula mediante un pipeline ETL (*Extract, Transform, Load*) desarrollado en Python, que puede ejecutarse de forma programada o bajo demanda según las necesidades del sistema.

La extracción de datos se realiza conectando con la API de Google Sheets, desde donde se recuperan los registros introducidos por los usuarios. A continuación, se aplica una validación geográfica que garantiza que las coordenadas GPS se encuentren dentro del territorio español, descartando automáticamente entradas fuera de los límites definidos. El proceso continúa con una fase de limpieza, en la que se normalizan formatos, se eliminan duplicados y se corrigen inconsistencias.

La carga final se realiza en una base de datos PostgreSQL, alojada en Supabase, una plataforma Backend-as-a-Service que ofrece una instancia gestionada sin necesidad de administrar infraestructura propia. Esta base de datos incorpora la extensión PostGIS, lo que permite trabajar de forma nativa con datos geoespaciales. El esquema de almacenamiento ha sido optimizado para consultas frecuentes, incluyendo índices espaciales y funciones personalizadas que permiten agrupar mediciones en cuadrículas de 10 metros de lado. Esta funcionalidad resulta clave para mejorar el rendimiento de las consultas y facilitar la generación de visualizaciones fácilmente interpretables.

3.2.3 Capa de presentación y visualización web

La capa de presentación se basa en una arquitectura web tradicional que sigue el patrón MVC (Modelo-Vista-Controlador) [46]. En este esquema, PHP actúa como controlador, gestionando la lógica de negocio y las consultas a la base de datos; PostgreSQL representa el modelo, donde se almacenan y estructuran los datos; y HTML y CSS, junto con el lenguaje de programación JavaScript, conforman la vista, encargada de la interfaz con el usuario.

La comunicación entre el *backend* y la base de datos se realiza a través de la API REST de Supabase, utilizando un sistema de gestión de sesiones concurrentes (*session pooler*) que reduce la latencia y mejora la eficiencia en entornos con múltiples usuarios. En el frontend, se ha optado por una implementación ligera y sostenible, utilizando JavaScript estándar en lugar de frameworks externos. Esta decisión responde al principio de soberanía tecnológica, asegurando que el código sea fácilmente mantenible y libre de dependencias que puedan quedar obsoletas. Para enriquecer la experiencia del usuario, se han integrado tres librerías especializadas:

- Chart.js, que permite generar gráficos estadísticos interactivos, como series temporales, comparativas por operador y distribuciones por provincia [42].
- Leaflet.js, utilizada para la visualización de mapas interactivos con funcionalidades avanzadas como clustering dinámico, spiderfier para marcadores superpuestos y soporte para múltiples capas de información [43].
- Luxon.js, que facilita el manejo preciso de fechas y zonas horarias, especialmente útil en la representación de series temporales y en la sincronización de datos [44].

3.2.4 Flujo de datos y comunicación entre capas

El sistema *RurAirConnect* articula su funcionamiento mediante un flujo de información secuencial que conecta las tres capas principales de su arquitectura: captura, procesamiento y presentación. Este flujo, de carácter unidireccional, está diseñado para garantizar la coherencia estructural del sistema, facilitar la trazabilidad de los datos y permitir su validación en cada etapa.

Este esquema se representa en la Figura 3, donde se visualiza el flujo de datos entre las tres capas funcionales del sistema. El diagrama permite identificar claramente los

componentes tecnológicos implicados en cada etapa, así como el recorrido que sigue la información desde su captura inicial hasta su presentación final en la interfaz web.

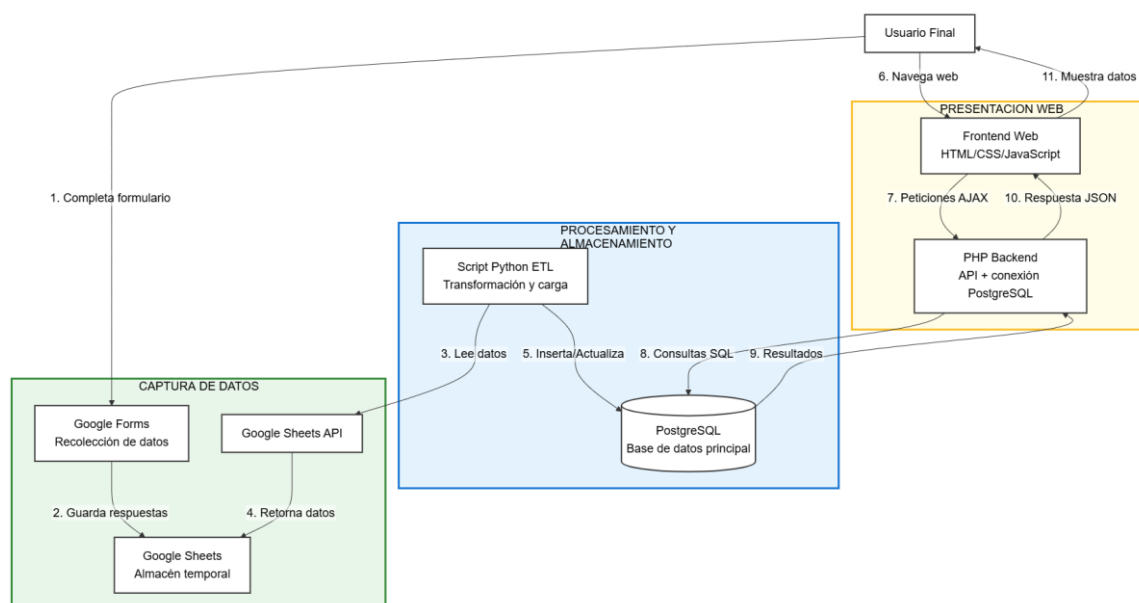


Figura 3. Diagrama de arquitectura por capas y comunicación entre componentes del sistema.

La entrada de datos se produce en la capa de captura, mediante un formulario web desarrollado con Google Forms, complementado por Google Apps Script para la obtención automática de coordenadas GPS y metadatos del dispositivo. Los registros generados se almacenan temporalmente en Google Sheets, que actúa como repositorio intermedio y facilita la sincronización en entornos con conectividad limitada.

En la capa de procesamiento, se emplean scripts desarrollados en Python que acceden a los datos mediante la API de Google Sheets. Estos scripts ejecutan tareas de validación geográfica, limpieza de registros, enriquecimiento contextual y transformación de formatos. Los datos procesados se insertan en una base de datos PostgreSQL alojada en Supabase, utilizando transacciones por lotes para optimizar el rendimiento y preservar la integridad referencial. La extensión PostGIS permite realizar operaciones geoespaciales avanzadas, fundamentales para las funcionalidades de análisis y visualización.

Finalmente, en la capa de presentación, el *backend* implementado en PHP gestiona las peticiones del cliente, ejecuta consultas espaciales y temporales sobre la base de datos, y devuelve los resultados agregados. El *frontend*, construido con HTML, CSS y JavaScript, se encarga de renderizar los datos mediante componentes visuales interactivos.

3.2.5 Consideraciones de rendimiento y escalabilidad

Para garantizar un funcionamiento eficiente incluso con grandes volúmenes de datos, se han incorporado diversas optimizaciones en cada capa del sistema:

- *En la base de datos:* Se han definido índices espaciales y compuestos y funciones almacenadas para cálculos complejos.
- *En la capa de aplicación:* Se emplea un *session pooler*, que es una herramienta que gestiona múltiples conexiones simultáneas a la base de datos reutilizando sesiones activas. También se emplean consultas parametrizadas para evitar inyecciones SQL, y se realiza agregación de datos en el servidor para reducir la carga de procesamiento en el cliente.
- *En el frontend:* Se ha implementado agrupación dinámica de marcadores (*clustering*) para manejar zonas con alta densidad de puntos, carga asíncrona para evitar bloqueos de interfaz y diseño responsive para asegurar compatibilidad con dispositivos móviles.

3.3 Obtención de datos de cobertura móvil

La captura de datos en la plataforma *RurAirConnect* se fundamenta en un enfoque de ciencia ciudadana que combina el uso de dispositivos móviles convencionales y sensores ambientales accesibles. Esta estrategia permite obtener mediciones simultáneas de calidad de cobertura móvil y parámetros ambientales de manera distribuida y económicamente viable, adaptándose a las limitaciones presupuestarias de instituciones educativas y facilitando la participación de usuarios no especializados en proyectos de investigación colaborativa. A continuación, en las siguientes secciones se pasan a explicar cómo se ha diseñado el proceso de captura de datos de cobertura móvil.

3.3.1 Evaluación de alternativas para la medición de cobertura móvil

Antes de abordar las metodologías de medición, resulta fundamental comprender el panorama del espectro radioeléctrico utilizado por las tecnologías móviles en España. Las bandas de frecuencia asignadas para servicios 4G y 5G constituyen el objeto de estudio de este proyecto, ya que determinan tanto las capacidades de los equipos de medición como los parámetros técnicos relevantes para la evaluación de cobertura.

Las bandas de frecuencia utilizadas para tecnologías 4G LTE en España utilizan varias bandas de frecuencia. Destacan la Banda 3 (1800 MHz) empleada para LTE en modalidad FDD (*Frequency Division Duplex*), la Banda 7 (2600 MHz) también en FDD que proporciona alta capacidad en entornos urbanos. La Banda 20 (800 MHz) en FDD es utilizada principalmente para cobertura rural debido a sus excelentes características de propagación. La Banda 1 (2100 MHz), en FDD, ofrece un equilibrio entre cobertura y capacidad. Por último, la Banda 8 (900 MHz) en FDD que complementa la cobertura en interiores y zonas rurales [47].

En cuanto a las tecnologías 5G NR, el despliegue en España se basa en varias bandas actualmente. La Banda n78 (3500 MHz) es utilizada para 5G en modalidad TDD (*Time Division Duplex*), es la banda principal para servicios 5G de alta velocidad. La Banda n28 (700 MHz) en FDD que proporciona cobertura extendida especialmente relevante para entornos rurales. La Banda n1 (2100 MHz) es empleada para 5G en FDD con tecnología DSS (*Dynamic Spectrum Sharing*) que permite la coexistencia con servicios 4G. Finalmente, la Banda n258 (26 GHz) en TDD está destinada a aplicaciones de ultra-alta velocidad en entornos urbanos densos, aunque con limitada penetración actual en el territorio español [47].

Esta distribución del espectro radioeléctrico es utilizada por los principales operadores en España, incluyendo Movistar, Vodafone, Orange y MásMóvil, para ofrecer servicios de comunicaciones móviles que abarcan desde tecnologías 2G hasta las más avanzadas implementaciones 5G.

Para la obtención de mediciones de intensidad de señal móvil, inicialmente se valoró el uso de analizadores de espectro portátiles de bajo coste disponibles en plataformas de venta online y distribuidores especializados. Se realizó una búsqueda exhaustiva de opciones técnica y económicamente viables para instituciones educativas, considerando tanto universidades con presupuestos moderados como institutos de educación secundaria con recursos más limitados.

El análisis técnico de estas alternativas reveló limitaciones críticas para su aplicación en el contexto del proyecto *RurAirConnect*. En primer lugar, la sensibilidad insuficiente constituye un obstáculo fundamental, ya que al trabajar con señales de -100 dBm o menos, típicas en entornos rurales con cobertura limitada, la mayoría de los

analizadores evaluados no alcanzan la sensibilidad necesaria para detectar y caracterizar adecuadamente señales móviles débiles características de las zonas objetivo del estudio.

Además, las opciones más extendidas, como el analizador TinySA que se muestra en la Figura 4, presentan problemas conocidos trabajando con señales por encima de 600kHz, ya que pueden aparecer representadas en frecuencias incorrectas como indica su documentación [48].

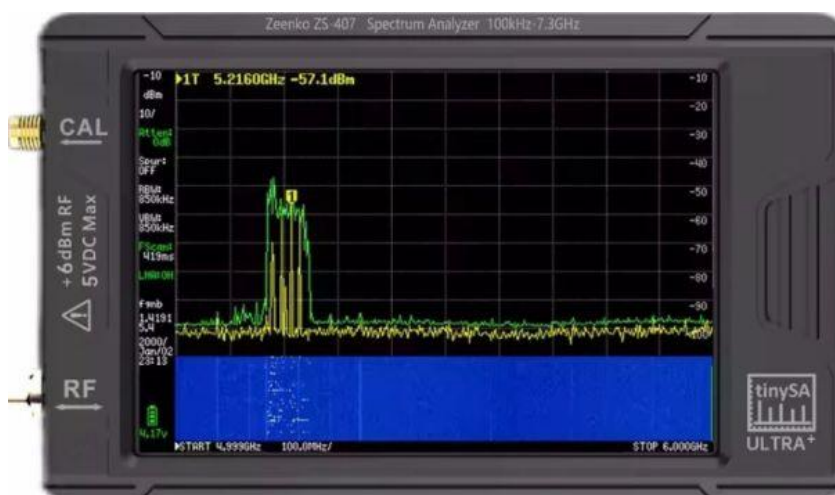


Figura 4. Analizador de espectro portátil TinySA Ultra [48].

Las limitaciones de discriminación representan otro factor decisivo en el descarte de estos equipos, puesto que no permiten distinguir entre diferentes operadores de telecomunicaciones, limitándose únicamente a identificar la ocupación espectral de bandas de frecuencia específicas sin proporcionar información sobre la procedencia o características específicas de las señales detectadas.

La complejidad operativa constituye una barrera significativa para la implementación en proyectos de ciencia ciudadana, ya que estos dispositivos requieren conocimientos especializados en radiofrecuencia, análisis espectral y procesamiento de señales que exceden considerablemente el perfil técnico de los usuarios objetivo, principalmente estudiantes y educadores de nivel secundario y universitario.

El análisis coste-beneficio revela que los modelos con prestaciones técnicas adecuadas para los objetivos del proyecto superan significativamente los presupuestos disponibles en instituciones educativas, mientras que las alternativas económicamente viables presentan limitaciones técnicas que comprometen la calidad y fiabilidad de las mediciones.

Finalmente, las limitaciones de portabilidad y autonomía operativa de muchos de estos equipos, que requieren alimentación externa, tienen dimensiones poco prácticas para mediciones de campo extensas, o presentan interfaces de usuario complejas, los hace inadecuados para su implementación en campañas de medición distribuidas con participación ciudadana.

Ante las limitaciones identificadas en los analizadores de espectro convencionales, se optó por utilizar dispositivos móviles (smartphones) Android e iPhone como instrumentos principales de medición. Esta decisión se fundamenta en un análisis exhaustivo de ventajas técnicas y prácticas que los convierten en la opción más adecuada para los objetivos del proyecto.

Desde el punto de vista técnico, los dispositivos móviles modernos incorporan módems celulares con sensibilidad optimizada que están específicamente diseñados para operar con señales de hasta -120 dBm según las pruebas realizadas, superando significativamente las capacidades de los analizadores de espectro de bajo coste evaluados. Esta sensibilidad resulta crucial para detectar y caracterizar señales móviles débiles presentes en entornos rurales.

La capacidad de discriminación por operador representa una ventaja fundamental, ya que los smartphones poseen la capacidad inherente de identificar, conectarse y obtener métricas específicas de redes de diferentes operadores de telecomunicaciones, proporcionando información granular que no es accesible mediante analizadores de espectro convencionales.

Además, el acceso a APIs especializadas constituye otro factor técnico determinante, puesto que los sistemas operativos móviles proporcionan interfaces de programación que permiten acceder a métricas de red estandarizadas por 3GPP, incluyendo parámetros como RSRP (*Reference Signal Received Power*), RSRQ (*Reference Signal Received Quality*), SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), identificación de bandas de frecuencia, e información detallada sobre celdas base [49].

También es importante destacar que la calibración de fábrica garantiza que los chipsets de radiofrecuencia integrados en smartphones están calibrados según estándares industriales rigurosos, asegurando la precisión y trazabilidad de las mediciones realizadas, aspecto crítico para la validez científica de los datos recopilados.

Así pues, desde la perspectiva práctica, la ubicuidad de los smartphones entre la población objetivo asegura la disponibilidad universal de instrumentos de medición sin necesidad de inversiones adicionales significativas, facilitando la implementación del proyecto en múltiples ubicaciones geográficas de manera simultánea.

La interfaz familiar que presentan estos dispositivos elimina barreras de adopción tecnológica, ya que los usuarios están familiarizados con su operación básica, reduciendo significativamente los requerimientos de formación técnica especializada y minimizando la probabilidad de errores operativos durante las mediciones.

La conectividad integrada permite la transmisión automática de datos recopilados hacia la plataforma centralizada, eliminando pasos manuales de transferencia de información y reduciendo la posibilidad de pérdida o corrupción de datos durante el proceso de recolección.

La geolocalización precisa proporcionada por sistemas GPS integrados, con precisión submétrica en condiciones operativas óptimas, permite asociar cada medición con coordenadas geográficas exactas, requisito fundamental para el análisis espacial de cobertura móvil y la generación de mapas de calidad de señal.

3.3.2 Captura de datos de cobertura móvil con smartphones

En las siguientes secciones se procede a explicar la configuración de diferentes tipos de smartphones para la obtención de datos de cobertura móvil. Además, se va a realizar un análisis de las principales métricas de calidad de la señal elegidas para nuestra plataforma.

3.3.2.1 Configuración de la captura de datos en dispositivos Android

Para dispositivos Android, el procedimiento de configuración implica navegar a la sección Configuración, acceder al menú Conexiones y seleccionar Redes móviles, donde se debe localizar la opción "Modo de red" o "Tipo de red preferido" según la versión del sistema operativo. Para mediciones exclusivas de tecnología 4G LTE, se debe seleccionar "LTE/4G únicamente" o alternativamente "LTE/3G/2G (conexión automática)", verificando posteriormente que la conexión efectiva sea 4G mediante los indicadores de estado en la barra superior del dispositivo.

Para mediciones que incluyan tecnología 5G cuando esté disponible en la zona de estudio, se debe seleccionar "5G/LTE/3G/2G (conexión automática)" en dispositivos compatibles con esta tecnología, confirmando la conexión 5G activa mediante la iconografía específica del sistema operativo, considerando que las implementaciones 5G NSA (*Non-Standalone*) mantienen un anclaje 4G simultáneo que puede influir en las métricas obtenidas. En la Figura 5, se muestra la pantalla de configuración explicada anteriormente.

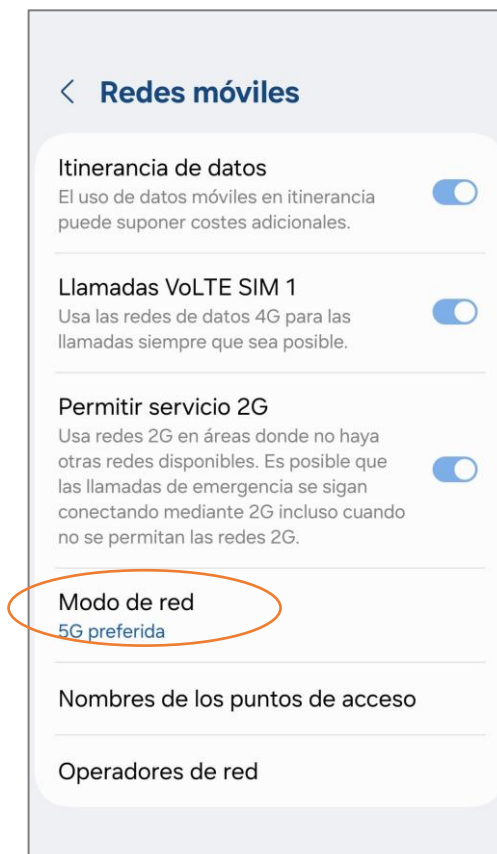


Figura 5. Ejemplo de configuración de modos de red en un smartphone Samsung A54.

Las configuraciones complementarias incluyen la desactivación del modo de ahorro de datos para evitar limitaciones artificiales en la conectividad, la deshabilitación completa de conexiones WiFi durante las sesiones de medición para forzar el uso exclusivo de conectividad celular, y la activación de servicios de localización de alta precisión para asegurar la máxima exactitud en las coordenadas GPS asociadas a cada medición.

3.3.2.2 Configuración de la captura de datos en dispositivos iPhone

Para dispositivos iPhone, el procedimiento requiere acceder a la sección Configuración, navegar a Datos móviles, seleccionar "Opciones de datos móviles" y

posteriormente "Voz y datos". Para mediciones 4G se debe seleccionar "LTE" o "4G" según la nomenclatura utilizada por la versión del sistema operativo, mientras que para mediciones 5G se debe activar "5G activado" o "5G automático" en función de la disponibilidad de cobertura y las características del dispositivo.

En los modelos más recientes este paso ya no resulta tan relevante, ya que cuando más adelante en este capítulo se muestre como acceder a la información de señal, se puede apreciar como se muestra la información disponible para ambas tecnologías si en nuestra ubicación están disponibles.

Las configuraciones adicionales para dispositivos iPhone incluyen la verificación de que "Roaming de datos" esté activado si resulta relevante para la zona de medición, la desactivación de "Modo de datos reducidos" para evitar limitaciones artificiales en el consumo de datos, y el mantenimiento activo de "Servicios de localización" para asegurar la disponibilidad de información GPS precisa.

3.3.2.3 Métricas seleccionadas para evaluar la calidad de la señal móvil

Los dispositivos móviles proporcionan acceso a múltiples métricas de calidad de señal estandarizadas por organizaciones internacionales de telecomunicaciones. Para el proyecto *RurAirConnect*, se ha realizado una selección cuidadosa de los parámetros más relevantes, accesibles y representativos de las condiciones de cobertura móvil en entornos rurales.

El parámetro seleccionado para las mediciones en la plataforma *RurAirConnect* es el RSRP (*Reference Signal Received Power*), que representa la potencia promedio recibida de las señales de referencia específicas de la celda base a la que está conectado el dispositivo, según se define en las especificaciones técnicas 3GPP [49]. Este parámetro se expresa en decibelios-milivatio (dBm) y típicamente presenta valores en el rango de -140 dBm a -44 dBm, donde valores más altos (menos negativos) indican mejor calidad de cobertura. El RSRP constituye el indicador más directo y universalmente comparable de la intensidad de señal recibida, siendo especialmente relevante para evaluar la cobertura en tecnologías 4G LTE y 5G NR.

Aunque el sistema de captura registra exclusivamente valores de RSRP para mantener la simplicidad operativa y la consistencia de datos, los dispositivos móviles proporcionan acceso a parámetros complementarios que pueden ser observados para

validación o diagnóstico. El RSRQ (*Reference Signal Received Quality*) representa la relación entre RSRP y RSSI (Received Signal Strength Indicator), proporcionando información sobre la calidad relativa de la señal en presencia de interferencias y ruido. El SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) indica la relación entre la potencia de señal útil y la suma de interferencias más ruido, siendo especialmente relevante para evaluar la calidad de comunicación en entornos con múltiples fuentes de interferencia.

La identificación de bandas de frecuencia permite determinar qué portadoras específicas (por ejemplo, B20, B3, n78) están siendo utilizadas por el dispositivo, información valiosa para comprender las estrategias de despliegue de los operadores y las características de propagación en diferentes entornos geográficos. El Cell ID proporciona un identificador único de la celda base que sirve la conexión, permitiendo análisis detallados de distribución geográfica de infraestructura y patrones de handover entre celdas adyacentes.

Aunque se nombran en la sección siguiente, a continuación, se muestra un ejemplo de esta información recogida de los datos del smartphone con sistema operativo Android y como se muestra en la aplicación Netmonitor en la Figura 6 [50].



Figura 6. Ejemplo de la información de señal mostrada por la aplicación Netmonitor en dispositivo Android.

3.3.2.4 Metodología de captura de mediciones móviles

El protocolo de medición establecido prioriza la simplicidad operativa, la reproducibilidad de resultados y la minimización de fuentes de error, asegurando que usuarios con diferentes niveles de experiencia técnica puedan contribuir datos de calidad consistente al proyecto de ciencia ciudadana.

La preparación del dispositivo constituye el primer paso crítico del protocolo e implica configurar la tecnología objetivo (4G LTE de manera obligatoria, con 5G como opción adicional cuando esté disponible en la zona de medición), desactivar completamente las conexiones WiFi y Bluetooth para evitar interferencias o conexiones automáticas no deseadas, y asegurar que la batería del dispositivo mantiene un nivel superior al 30% para prevenir la activación automática de modos de ahorro energético que puedan degradar las capacidades del módem celular.

El posicionamiento adecuado para la realización de mediciones requiere priorizar ubicaciones exteriores siempre que las condiciones meteorológicas y de seguridad lo permitan, mantener el dispositivo en posición vertical a altura aproximada del pecho para simular condiciones típicas de uso, evitar obstrucciones físicas significativas como edificios, vegetación densa o vehículos que puedan atenuar o reflejar las señales móviles, y permitir un período de estabilización de la conexión de 30 a 60 segundos antes de proceder con la captura de datos para asegurar que el dispositivo ha completado los procesos de selección y optimización de celda.

La captura efectiva de datos se realiza mediante aplicaciones especializadas que varían según el sistema operativo del dispositivo. Para dispositivos Android, se disponen de dos alternativas. La primera consiste en usar los datos que aporta el propio dispositivo en su sección de ajustes, habitualmente en secciones como “Información de estado” o “Estado de la tarjeta SIM”, donde la información obtenida se aprecia en la Figura 7.

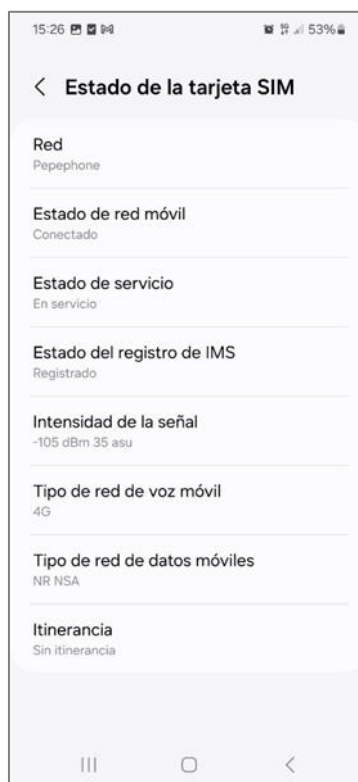


Figura 7. Información de parámetros de señal móvil obtenidos desde la sección de Ajustes de un dispositivo Samsung.

La segunda opción es la utilización de aplicaciones como "Network Cell Info Lite" o "Netmonitor" disponible en la App Store del teléfono, que proporcionan acceso directo a las métricas de red del sistema operativo, registrando únicamente el valor RSRP expresado en dBm e identificando claramente el operador de telecomunicaciones activo en el momento de la medición.

En el subapartado anterior ya se mostró un ejemplo de la visualización de la aplicación "Netmonitor", en la Figura 8 se puede ver las pantallas que ofrece la aplicación "Network Cell Info Lite". En este caso, resulta interesante ver como en la pantalla de la izquierda identifica correctamente el operador al que corresponde la tarjeta SIM, pero en el resto de las pantallas a quien identifica es al operador que es propietario de la infraestructura de red en esa zona.

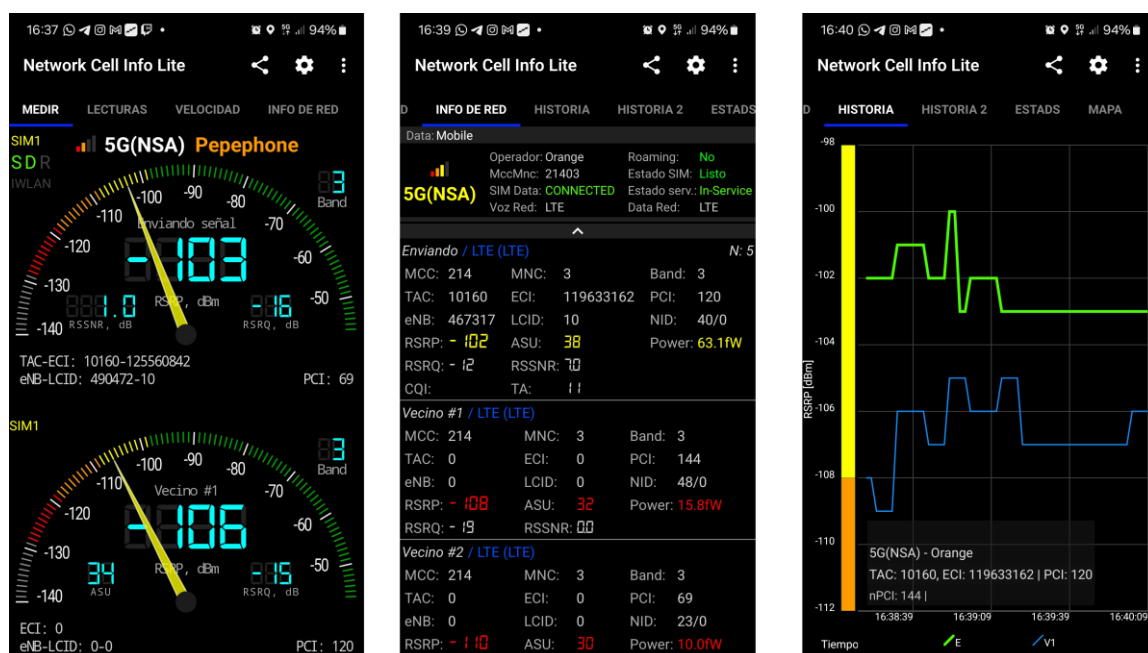


Figura 8. Ejemplos de pantallas visualizadas en la aplicación "Network Cell Info Lite" con datos de cobertura móvil.

Para dispositivos iPhone, el acceso a métricas detalladas requiere la activación del *Field Test Mode* mediante el marcado del código *3001#12345#* en la aplicación de Teléfono, lo que proporciona acceso a información técnica normalmente oculta al usuario final, permitiendo la lectura manual de valores de intensidad de señal y la identificación del operador activo. Debido a cambios en la política del fabricante, las aplicaciones ya no pueden acceder a esta información, de modo que no hay software específico para estos dispositivos.

Al contrario que en los dispositivos con sistema operativo Android, los dispositivos iPhone muestran mucha más información técnica desde su herramienta nativa, aunque esté más inaccesible al usuario. Como se puede apreciar en la Figura 9, además se pueden obtener datos de redes 4G si tenemos conectividad 5G, de manera que la toma de medidas se simplifica.

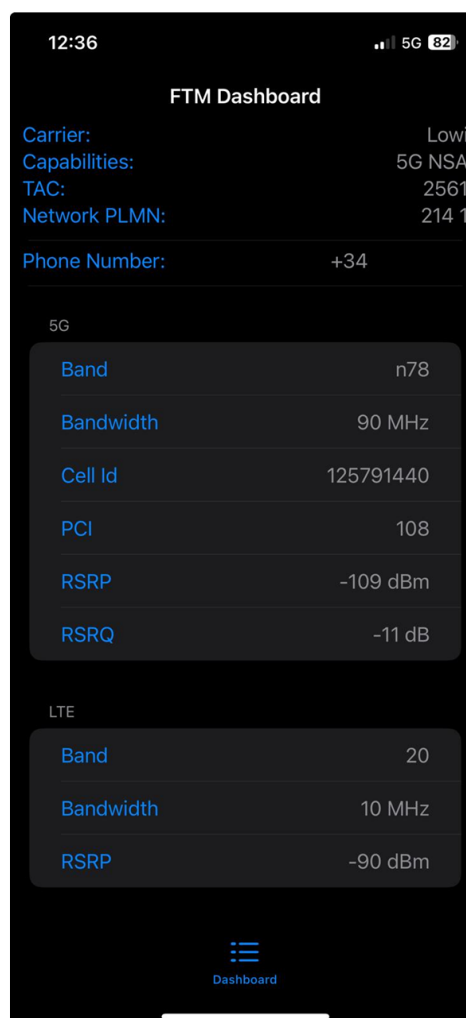


Figura 9. Visualización de datos en *Field Test Mode* de iOS en un dispositivo iPhone.

La información contextual asociada a cada medición incluye las coordenadas GPS automáticas del punto donde se realiza la captura, proporcionadas por el sistema de geolocalización del dispositivo, la identificación específica del operador de telecomunicaciones (Movistar, Vodafone, Orange, MásMóvil u otros operadores virtuales), y el *timestamp* automático generado por el sistema de formularios de Google Forms en el momento del envío de datos, asegurando la trazabilidad temporal de cada medición.

3.4 Captura de datos ambientales mediante sensores portátiles

Tal y como se ha comentado, la captura de datos en la plataforma *RurAirConnect* se fundamenta en un enfoque de ciencia ciudadana que combina el uso de dispositivos móviles convencionales y sensores ambientales accesibles. Esta estrategia permite obtener mediciones simultáneas de calidad de cobertura móvil y parámetros ambientales de manera distribuida y económicamente viable. A continuación, en las siguientes secciones se pasan a explicar cómo se ha diseñado el proceso de captura de datos ambientales con sensores.

3.4.1 Contexto profesional de medición de calidad del aire

La evaluación profesional de la calidad del aire, tal como se implementa en sistemas nacionales como el Índice de Calidad del Aire (ICA) español, se basa en metodologías científicas rigurosas que requieren mediciones continuas de múltiples contaminantes durante períodos extendidos, típicamente promedios de 24 horas para partículas y períodos de 8 horas para gases, con el objetivo de obtener valores representativos que permitan evaluaciones precisas del riesgo para la salud pública.

El ICA español, gestionado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, considera múltiples contaminantes con límites establecidos por la normativa europea. Los valores límites de los contaminantes para la protección de la salud aplicables en España se encuentran definidos por el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero.

Este decreto establece que las partículas PM_{2.5} y PM₁₀ se miden en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) con límites anuales de 25 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, establecidos para proteger la salud humana considerando los efectos a largo plazo de la exposición a material particulado. El dióxido de nitrógeno (NO₂) presenta un límite horario de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor límite anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, reflejando su importancia como indicador de contaminación vehicular e industrial. El ozono troposférico (O₃) presenta un umbral de información de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculado como promedio de 8 horas, siendo especialmente relevante durante los meses de mayor insolación. El monóxido de carbono (CO) mantiene un valor límite de 10 mg/m^3 para períodos de 8 horas, reflejando su naturaleza como contaminante primario resultado de combustión incompleta. El dióxido de azufre (SO₂) presenta un límite horario de 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un límite diario de 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

aunque su relevancia ha disminuido considerablemente debido a la reducción del contenido de azufre en combustibles [51].

Este enfoque profesional requiere estaciones de monitorización fijas equipadas con instrumentación de alta precisión y coste elevado, sistemas de calibración automática, mantenimiento especializado realizado por técnicos certificados, y costes operativos significativos que incluyen consumo energético, comunicaciones, y reemplazo periódico de componentes. Las estaciones oficiales de calidad del aire pueden alcanzar costes de instalación superiores a 100.000 euros y requerir gastos anuales de mantenimiento del orden de 15.000-25.000 euros por estación.

3.4.2 Alternativas para la medición de parámetro de calidad del aire

El proyecto *RurAirConnect* adopta un enfoque metodológico accesible y participativo para estudiar la calidad del aire en entornos rurales, en el marco de la ciencia ciudadana. Los equipos profesionales necesarios para un seguimiento preciso, como analizadores de gases o contadores de partículas de alta precisión, presentan costes elevados y requieren conocimientos técnicos avanzados. Por ello, se ha optado por una solución más viable para contextos educativos y ciudadanos: el uso de sensores domésticos de bajo coste.

Aunque estos dispositivos presentan limitaciones en cuanto a precisión absoluta, permiten realizar mediciones puntuales de contaminantes relevantes como el dióxido de carbono (CO₂), el monóxido de carbono (CO) y las partículas en suspensión PM_{2.5} y PM₁₀. Esta aproximación no pretende sustituir a las redes oficiales de medición ambiental, pero resulta valiosa para la sensibilización, la formación científica y la obtención de datos indicativos sobre la relación entre calidad del aire y cobertura móvil en zonas de baja densidad poblacional. El uso de sensores domésticos responde también a criterios de viabilidad y aprovechamiento de recursos existentes. Durante la pandemia de COVID-19, muchas instituciones educativas adquirieron medidores de CO₂ para controlar la ventilación en interiores. Esta base instalada de dispositivos puede reutilizarse sin costes adicionales, lo que facilita la implementación del proyecto incluso en contextos con recursos limitados.

En este marco, el CO₂ se considera el contaminante prioritario, no solo por la disponibilidad de sensores, sino también por su valor pedagógico y su utilidad como indicador indirecto de ventilación y concentración humana. Aunque no es tóxico en niveles habituales, sus variaciones permiten inferir la acumulación de otros contaminantes asociados a la actividad humana y la falta de renovación del aire. Además, el CO₂ permite abordar contenidos transversales como el ciclo del carbono, la respiración celular o el impacto humano sobre la atmósfera, lo que lo convierte en una herramienta educativa versátil. Junto al CO₂, muchos de estos dispositivos incluyen sensores para medir monóxido de carbono (CO), un gas tóxico generado en combustiones incompletas, y partículas en suspensión PM2.5 y PM10, que tienen efectos reconocidos sobre la salud respiratoria. Aunque estos sensores no alcanzan la precisión de los equipos profesionales, ofrecen datos suficientemente fiables para identificar patrones generales, comparar entornos y fomentar la comprensión crítica entre los participantes. Con el objetivo de comprobar la viabilidad de este enfoque, se ha estado trabajando y tomando medidas con un medidor de calidad del aire de la marca RISOON modelo ZN-MT29 que se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Instrumento de medida doméstico empleado durante las pruebas de la aplicación.

El dispositivo empleado integra sensores ópticos y electroquímicos de manejo sencillo, diseñados originalmente para uso en interiores. No obstante, mediante un protocolo de uso adaptado, es posible obtener datos representativos también en exteriores. Este protocolo incluye medidas como permitir que el sensor se estabilice durante varios

minutos antes de la medición, evitar fuentes de contaminación cercanas (vehículos o chimeneas), proteger el equipo de la radiación solar directa o la lluvia, y situarlo a una altura aproximada entre 1 metro y 1,5 metros del suelo en un entorno representativo del área de estudio.

Finalmente, todas las mediciones se realizan de forma puntual y se registran manualmente a través de un formulario digital. Este formulario recoge, además de los valores numéricos, información contextual clave: coordenadas GPS, momento exacto de la medición y operador de red móvil activo. Esta integración permite analizar posteriormente posibles correlaciones entre la calidad del aire y la cobertura móvil, uno de los objetivos centrales del proyecto.

Aunque el enfoque presenta limitaciones evidentes, como la precisión variable de los sensores, la falta de calibración profesional o la representatividad limitada de las mediciones puntuales, también ofrece ventajas importantes. Permite la participación directa de la ciudadanía, fomenta la alfabetización científica y contribuye a generar datos sobre entornos rurales que habitualmente quedan fuera del alcance de las redes oficiales de monitorización.

En resumen, se trata de una metodología diseñada para maximizar la viabilidad técnica y el valor educativo en contextos reales. Reconoce sus limitaciones, pero también su potencial como herramienta de concienciación, formación y exploración ambiental en clave ciudadana.

4

Desarrollo de la aplicación RurAirConnect

4.1 Introducción

El presente capítulo aborda el desarrollo práctico de la aplicación *RurAirConnect*, materializando las decisiones arquitectónicas descritas en el capítulo anterior. Se detallan los procesos de implementación de la interfaz web, el sistema de captura de datos y la base de datos relacional con soporte geoespacial.

La aplicación se ha concebido siguiendo principios de usabilidad, accesibilidad y claridad visual, con el propósito de ofrecer una experiencia intuitiva para perfiles diversos, desde especialistas técnicos hasta ciudadanos sin formación específica. Para lograrlo, se han implementado herramientas que combinan formularios digitales de captura, integración automática de datos de localización y módulos de visualización dinámica basados en mapas interactivos y gráficos analíticos.

Asimismo, se detalla el papel de la base de datos relacional con soporte geoespacial, diseñada para gestionar de manera estructurada la información recopilada y permitir consultas eficientes orientadas a la representación cartográfica. Finalmente, se incluyen consideraciones sobre las limitaciones técnicas y operativas encontradas, lo que permite identificar oportunidades de mejora y sentar las bases para posibles ampliaciones futuras del sistema.

4.2 Interfaz web y experiencia de usuario

La aplicación web *RurAirConnect* se ha diseñado con el objetivo de facilitar la interacción entre los usuarios y los datos generados por la plataforma. A través de la interfaz se concentran tanto las herramientas de consulta como las de participación, ofreciendo un entorno sencillo en el que es posible registrar información y, al mismo tiempo, explorar los resultados obtenidos.

El diseño de la experiencia de usuario se ha guiado por criterios de claridad, consistencia y accesibilidad, de modo que la navegación resulte intuitiva para perfiles con distintos niveles de experiencia digital. En este apartado se describen los apartados que conforman la interfaz, así como las decisiones tomadas para equilibrar la simplicidad visual con la presentación de información compleja.

Para alcanzar este equilibrio se tomaron varias decisiones de diseño. En primer lugar, se organizó la información en secciones diferenciadas que permiten una exploración progresiva, desde una visión general del proyecto hasta la consulta detallada de resultados. El uso de mapas interactivos facilita la representación de grandes volúmenes de datos geoespaciales de manera intuitiva, mientras que los gráficos dinámicos permiten identificar tendencias sin necesidad de analizar tablas extensas. Asimismo, se simplificó el proceso de participación mediante formularios con campos estructurados y funciones automáticas, como la captura de ubicación. Finalmente, se optó por un lenguaje accesible y acompañado de recursos visuales en apartados informativos, con el fin de garantizar la comprensión incluso para usuarios sin formación técnica.

La estructura visual de la interfaz se detalla en los apartados siguientes, donde se incluyen capturas representativas de cada sección funcional.

4.2.1 Estructura de navegación y componentes web

Una vez definida la arquitectura general en el capítulo anterior, la implementación web de *RurAirConnect* se organiza en seis secciones principales accesibles desde un menú de navegación fijo. El código fuente se encuentra disponible en el repositorio [52]:

- Inicio
- ¿Cómo funciona?
- Descubre el mapa

- Participa tú
- Resultados
- Contacto

En pantallas grandes, el menú se presenta como una barra horizontal tradicional. En dispositivos móviles o ventanas reducidas, se transforma en un menú desplegable activado mediante un botón de alternancia. Esta flexibilidad se logra combinando técnicas de diseño como *CSS Grid*, utilizada en disposiciones complejas como tarjetas informativas, y *Flexbox*, aplicado en alineaciones más simples como la barra de navegación.

La estructura modular de la aplicación permite cargar recursos específicos, como librerías de mapas o gráficos, únicamente cuando el usuario accede a la sección correspondiente. Este patrón de carga bajo demanda mejora el rendimiento inicial y reduce el consumo de recursos, especialmente en dispositivos con conectividad limitada.

4.2.2 Página de inicio y presentación del proyecto

La página de inicio de *RurAirConnect* cumple una doble función: presentar el propósito del proyecto y facilitar el primer contacto del usuario con la plataforma. Desde el punto de vista de experiencia de usuario, se ha diseñado como una entrada clara y accesible, que introduce los objetivos generales sin requerir conocimientos técnicos previos.

La Figura 11 presenta una captura de la página de inicio de *RurAirConnect*, donde se visualiza el bloque introductorio del proyecto y las tarjetas informativas que resumen las áreas de trabajo. En la parte superior se incluye una imagen representativa que refuerza visualmente el enfoque rural y participativo del proyecto, junto con un botón que enlaza con el apartado “¿Cómo funciona?”. Justo debajo, un bloque de texto breve explica la finalidad de la plataforma: “*permitir que cualquier persona, mediante dispositivos móviles accesibles, pueda registrar información de campo relacionada con la cobertura móvil y la calidad del aire*”. Este texto destaca también el carácter colaborativo del sistema, orientado a reducir desigualdades tecnológicas y ambientales en zonas rurales.

A continuación, se presentan tarjetas resumen que introducen las áreas de trabajo principales: el mapeo de conectividad, la monitorización ambiental, la ciencia ciudadana y la visualización de datos. Cada tarjeta incluye un título y una breve descripción, lo que permite al usuario identificar rápidamente el tipo de datos que puede aportar y consultar. Esta

estructura modular facilita una lectura rápida y una navegación progresiva hacia secciones más detalladas.



Figura 11. Página de inicio de *RurAirConnect*: presentación del proyecto y áreas de trabajo

4.2.3 Sección “¿Cómo funciona?”

La sección “¿Cómo funciona?” tiene como objetivo orientar al usuario antes de participar en la recogida de datos. Su diseño combina claridad conceptual con instrucciones prácticas, permitiendo que personas sin formación técnica comprendan qué tipo de información se solicita y cómo deben configurarse sus dispositivos para realizar las mediciones correctamente.

El contenido se organiza mediante acordeones interactivos, que permiten desplegar o contraer bloques informativos según el interés del usuario. Esta estructura favorece una navegación progresiva y evita la sobrecarga visual, especialmente en dispositivos móviles. Cada acordeón aborda un aspecto específico del proceso: desde la medición de intensidad de señal móvil hasta la configuración necesaria en Android o iPhone, pasando por la medición de contaminantes ambientales.

En el primer bloque se explica cómo interpretar los valores de intensidad de señal en dBm, aclarando que valores más cercanos a 0 indican mejor cobertura. Se ofrecen ejemplos concretos para facilitar la comprensión, como que -70 dBm representa una señal excelente, mientras que -120 dBm indica una señal débil o nula. También se indican pasos previos necesarios, como desactivar el Wi-Fi y activar la ubicación antes de iniciar la medición.

Los bloques dedicados a dispositivos Android e iPhone incluyen recomendaciones sobre aplicaciones compatibles, permisos requeridos y pasos para acceder a la información de señal. Finalmente, el apartado sobre contaminantes ambientales introduce brevemente los parámetros que pueden medirse y su relevancia en el contexto rural. En la Figura 12 se muestra una captura de esta sección, donde se aprecian los acordeones desplegables y el enfoque pedagógico adoptado para facilitar la participación ciudadana.

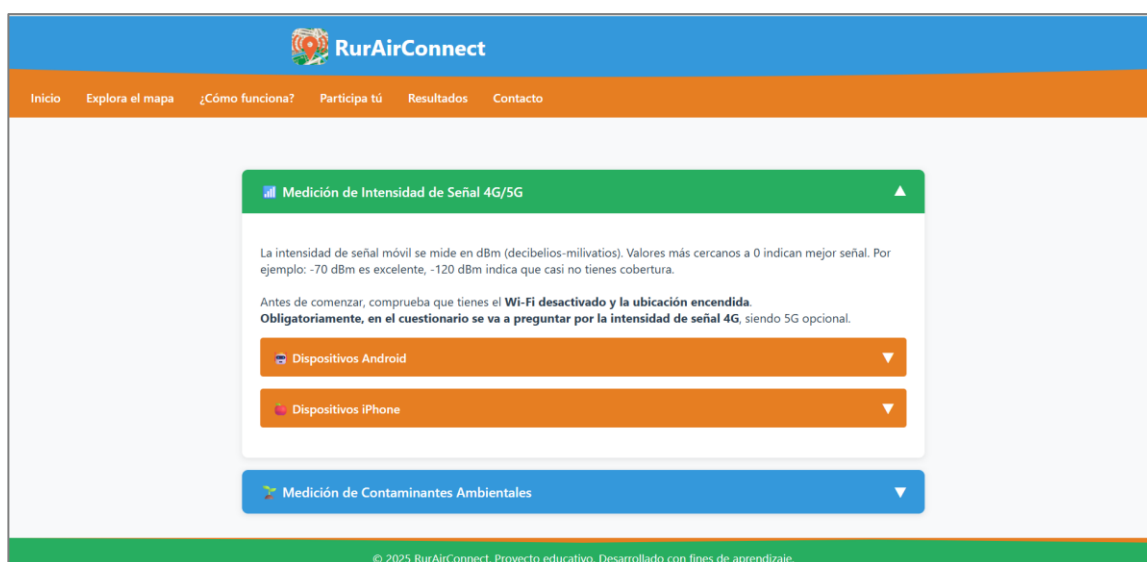


Figura 12. Sección "¿Cómo funciona?": explicación de conceptos

4.2.4 Visualización cartográfica “Descubre el mapa”

La sección “Descubre el mapa” constituye el núcleo visual de *RurAirConnect*, permitiendo explorar los datos recogidos por los usuarios. Su diseño combina herramientas de visualización geoespacial con controles interactivos que facilitan la navegación, la interpretación de los datos y la adaptación a distintos dispositivos.

Al cargar esta página, el mapa se inicializa centrado en la comunidad autónoma de Castilla y León, delimitando el área de estudio mediante coordenadas predefinidas. Esta configuración garantiza que la vista inicial sea coherente con el contexto territorial del proyecto y permite una exploración progresiva desde lo local hacia lo nacional.

Para reforzar esta contextualización, se incorporan los límites oficiales de Castilla y León mediante un servicio WFS (Web Feature Service) proporcionado por la Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECyL). Los datos se obtienen en formato GeoJSON y se representan con un estilo discreto, que no interfiere con las

capas de datos principales, como se puede apreciar en la Figura 13, donde se muestra esta vista inicial con la geometría autonómica resaltada.

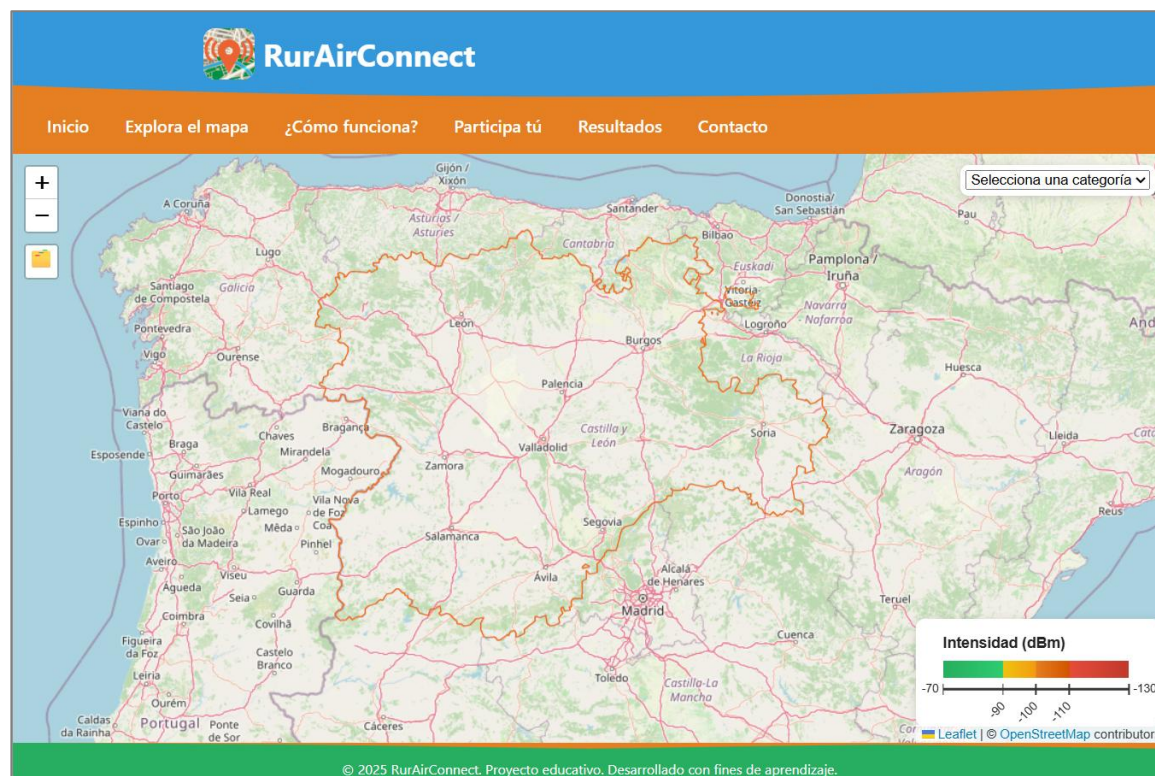


Figura 13. Vista inicial de "Explora el mapa" con geometría de Castilla y León resaltada.

El mapa permite visualizar dos tipos principales de datos: intensidad de señal móvil y contaminación atmosférica, que se puede seleccionar dentro de la caja “selecciona una categoría” en la parte superior derecha de la Figura 13. Cada uno se representa mediante una codificación visual específica que facilita su interpretación:

- Intensidad de señal móvil: escala de colores del verde (buena cobertura) al rojo (cobertura deficiente), basada en valores de dBm.
- Contaminación atmosférica: rangos definidos según los umbrales oficiales para cada contaminante (PM 2.5, PM 10, CO) y los definidos según literatura para CO₂ en secciones anteriores de esta memoria.

En función del tipo de datos que se seleccione, la interfaz se actualiza mediante el código contenido en `legendGenerator.js`, que se encarga de generar leyendas dinámicas que se adaptan automáticamente al tipo de dato seleccionado, como se puede observar en el repositorio que contiene el código fuente [52]. Por defecto, el mapa se inicia con la leyenda correspondiente a la cobertura móvil. En la Figura 14 se muestra un ejemplo

de visualización con datos de señal. Tal y como se observa se puede elegir analizar los datos de cobertura de una o varias compañías al mismo tiempo, en caso de que se seleccionen varias visualmente no se identifican los operadores en los marcadores en el mapa, ya que se representa el valor medio de intensidad mediante el color, pero se muestra la compañía a la que pertenecen las medidas al pulsar sobre el punto. Las compañías elegidas se corresponden a criterios de posesión de infraestructura, ser filiales o tener amplia presencia en el mercado debido a tarifas competitivas.

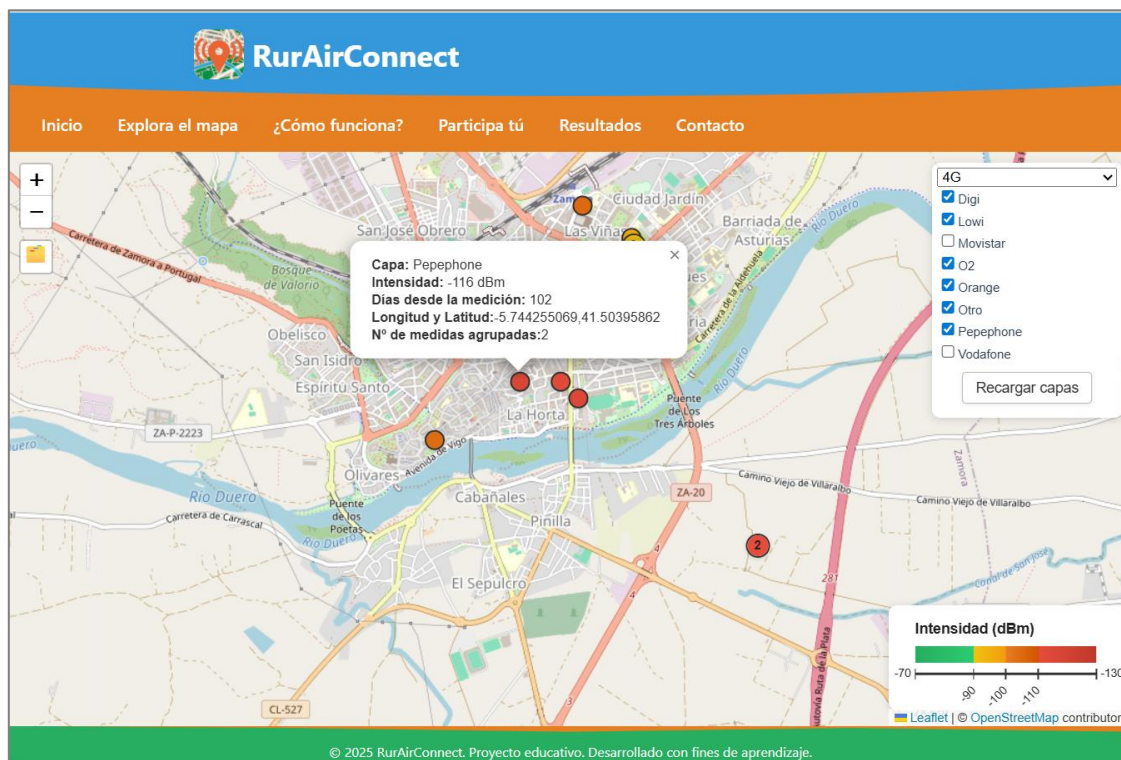


Figura 14. Visualización de datos de cobertura móvil 4G.

Al cambiar a datos de contaminación, la leyenda se actualiza automáticamente para reflejar los rangos de cada contaminante. Esta adaptación permite mantener la coherencia visual y evitar confusiones en la interpretación, como se puede apreciar en la Figura 15.

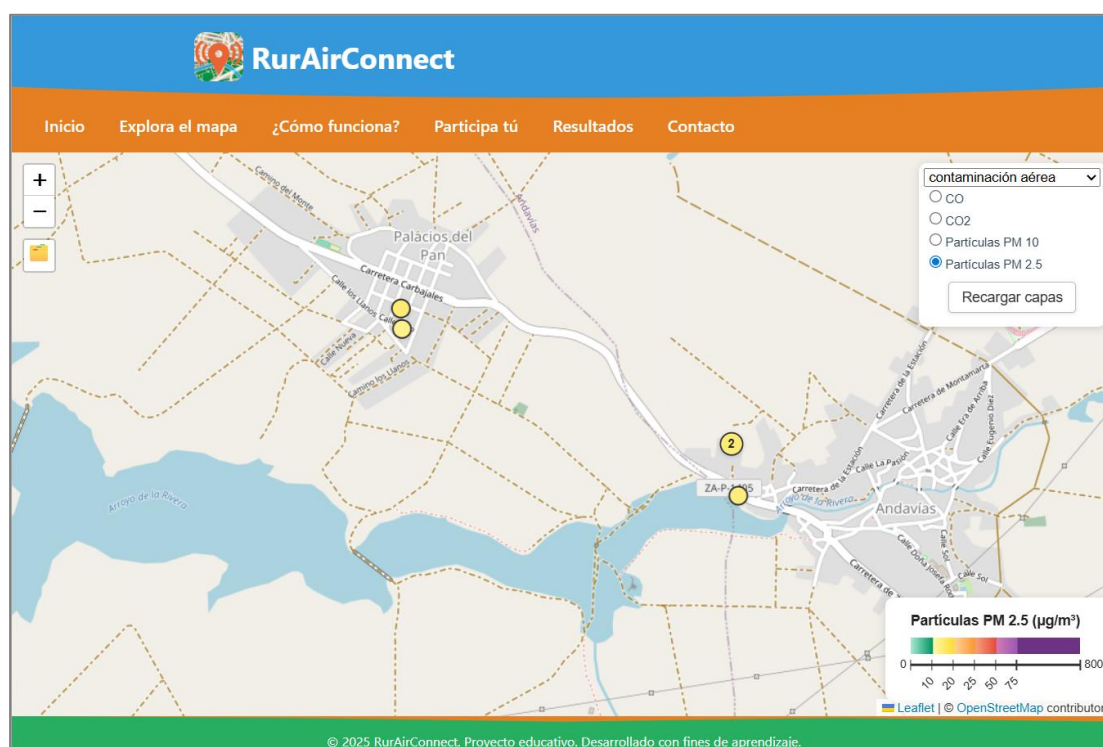


Figura 15. Visualización de datos de concentración de Partículas PM 2.5 en el mapa.

Tal y como se observa en la Figura 15, sólo se puede seleccionar la visualización de uno de los parámetros individualmente, ya que la leyenda y los puntos de interrupción cambian para cada uno, en este caso se ha seleccionado Partículas PM 2.5.

Para mejorar la visualización en zonas con alta densidad de mediciones, se ha implementado una serie de *Plugins* referenciados en la propia documentación de Leaflet. [53]. El primero es sistema de *clustering* o agrupación de marcadores mediante `Leaflet.markercluster`. Este sistema agrupa automáticamente los puntos cercanos y calcula un valor promedio que determina el color del *cluster*, ofreciendo una visión agregada sin perder detalle, además de mostrar el número de puntos agrupados. El color se calcula como la media de los valores contenidos en el grupo, lo que permite identificar zonas con mejor o peor cobertura o calidad del aire de forma intuitiva [54]. Además, se ha incorporado la funcionalidad *Overlapping Marker Spiderfier*, que despliega los marcadores de forma radial cuando varias mediciones comparten coordenadas idénticas. Esta herramienta evita la superposición y permite acceder a cada registro individual de forma clara, especialmente útil en entornos urbanos o en puntos de medición repetidos [55]. Ambas herramientas contribuyen a que el usuario tenga una buena experiencia de navegación en el mapa, ya que se adaptan al nivel de zoom y de densidad de datos. Su funcionamiento combinado se puede comprobar en la Figura 16.



Figura 16. Detalle del mapa con ejemplos visuales de agrupación (clustering) y despliegue radial (spiderfier) en zona urbana.

La última parte de la interfaz de usuario que queda por explicar es la relacionada con la selección de capas. Los controles son generados dinámicamente en función de las categorías presentes en la base de datos, esta consulta se realiza al cargar la página de manera que se disponga de datos actualizados.

En el desplegable se cargan las categorías disponibles, es decir, los tipos de señal móvil y contaminación. En función de la opción seleccionada, se generan los controles de selección correspondientes:

- **Cobertura móvil:** permite selección múltiple mediante *checkboxes*, ya que es útil comparar distintos operadores simultáneamente.
- **Contaminación atmosférica:** utiliza *radio buttons* para selección exclusiva, evitando la superposición de capas con escalas distintas.

A continuación, se muestra un fragmento del código empleado para la generación de los elementos de manera dinámica en función del tipo de datos a visualizar, el resto del código se encuentra en el repositorio público de Github incluido como fuente bibliográfica [52].

```
export function updateLayerList(layersData, category) {
  const useRadio = (category === 'contaminación aérea');
```

```
layersData.forEach(layerObj => {  
    const input = document.createElement('input');  
    input.type = useRadio ? 'radio' : 'checkbox';  
    // Configuración adicional del input...  
});  
}
```

Estos controles se pueden apreciar en la Figura 17, siendo la sección derecha la interfaz de usuario en el caso de seleccionar capas de datos de cobertura, y la izquierda la referente a datos de contaminación.

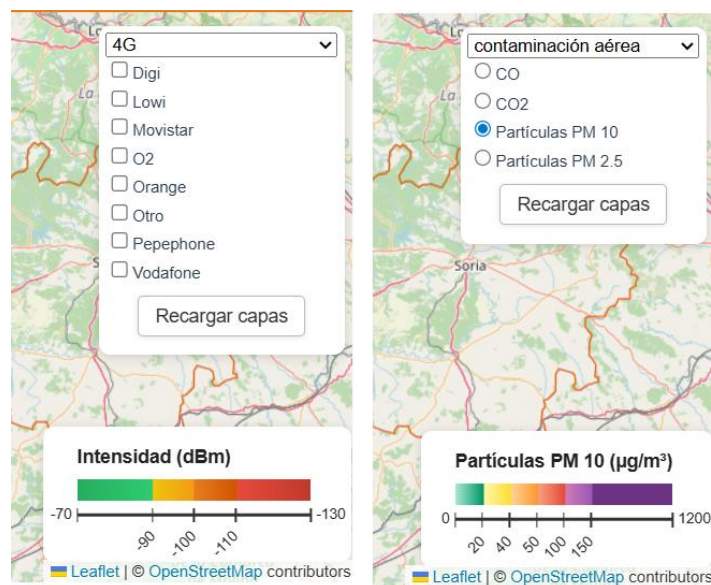


Figura 17. Comparativa de la interfaz de selección de capas para cobertura móvil y contaminación atmosférica.

Además, se ha incorporado un botón para ocultar o mostrar los controles de selección, lo que mejora la experiencia en dispositivos móviles al liberar espacio visual cuando no se están utilizando, como muestra la Figura 18.

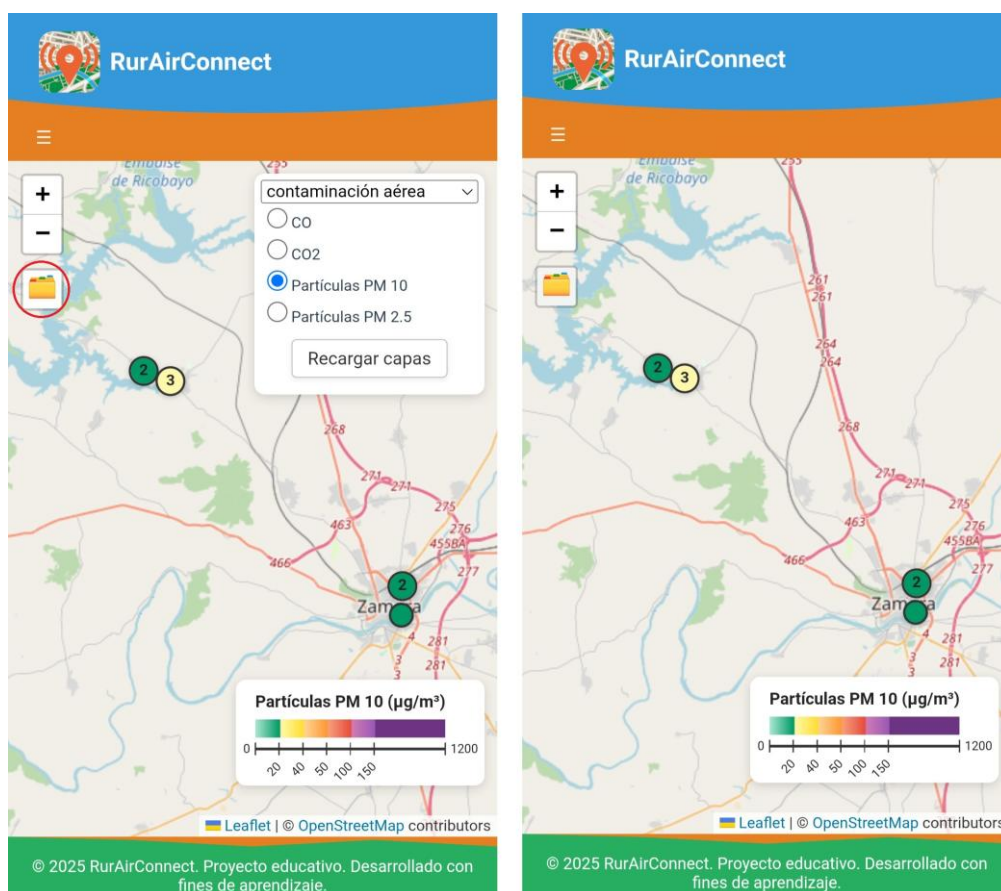


Figura 18. Funcionamiento del Botón para mostrar y ocultar el control de capas en móviles.

Una vez seleccionadas las capas, los datos en formato GeoJSON son procesados por el módulo de validación y transformación implementado en el fichero `geojsonLoader.js`. Solo se representan en el mapa aquellos registros que contienen coordenadas válidas y estructura geoespacial completa, lo que garantiza la fiabilidad de la visualización [52].

4.2.5 Página de resultados

La sección “Resultados” de *RurAirConnect* permite consultar los datos agregados recogidos por los usuarios, ofreciendo herramientas de análisis visual que facilitan la interpretación de la información. Su diseño combina filtros interactivos, gráficos dinámicos y una estructura modular que se adapta al tipo de dato seleccionado, manteniendo la simplicidad para el usuario sin comprometer el rendimiento del sistema.

Al acceder a esta sección, el usuario puede elegir entre dos categorías principales: Cobertura y Señal y Contaminación Ambiental. Cada categoría activa un conjunto específico de filtros que permiten ajustar la visualización según el tipo de señal,

contaminante, periodo de análisis o agrupación temporal. Estos filtros se generan dinámicamente en función de las opciones disponibles en la base de datos, y su activación desencadena la carga de los datos correspondientes desde el backend.

Comenzando por la categoría de Cobertura y Señal, como se puede observar en la Figura 19, se permite seleccionar los tipos de señal, que en este caso las disponibles son 4G y 5G, y el periodo de análisis, cuyas opciones disponibles abarcan desde la última semana hasta el histórico completo de los datos.

En cuanto a la categoría de Contaminación Ambiental (Figura 20), las principales diferencias radican en que se introduce un filtro para la agrupación temporal de los datos y en que los periodos de análisis son más reducidos, al únicamente abarcar desde el último mes hasta el año completo. En función del periodo a analizar seleccionado se permiten unos valores de agrupación temporal u otros, ya que no sería coherente mostrar datos de todo el año con agrupación diaria, al no poder garantizar una densidad de registros suficiente ni una visualización legible. Por ello, el sistema adapta automáticamente las opciones disponibles en el filtro de agrupación temporal según el periodo seleccionado. Por ejemplo, si el usuario elige un análisis de tres meses, se habilitan agrupaciones diarias o semanales; mientras que, para un análisis anual, se restringe la agrupación a rangos semanales o mensuales. Esta lógica condicional se implementa en el frontend mediante un sistema de validación cruzada entre filtros, que evita combinaciones incoherentes y mejora la experiencia de usuario. Además, permite mantener la eficiencia del sistema, ya que solo se solicitan al backend los datos necesarios para la visualización concreta, evitando cargas innecesarias y mejorando el rendimiento en dispositivos con conectividad limitada.

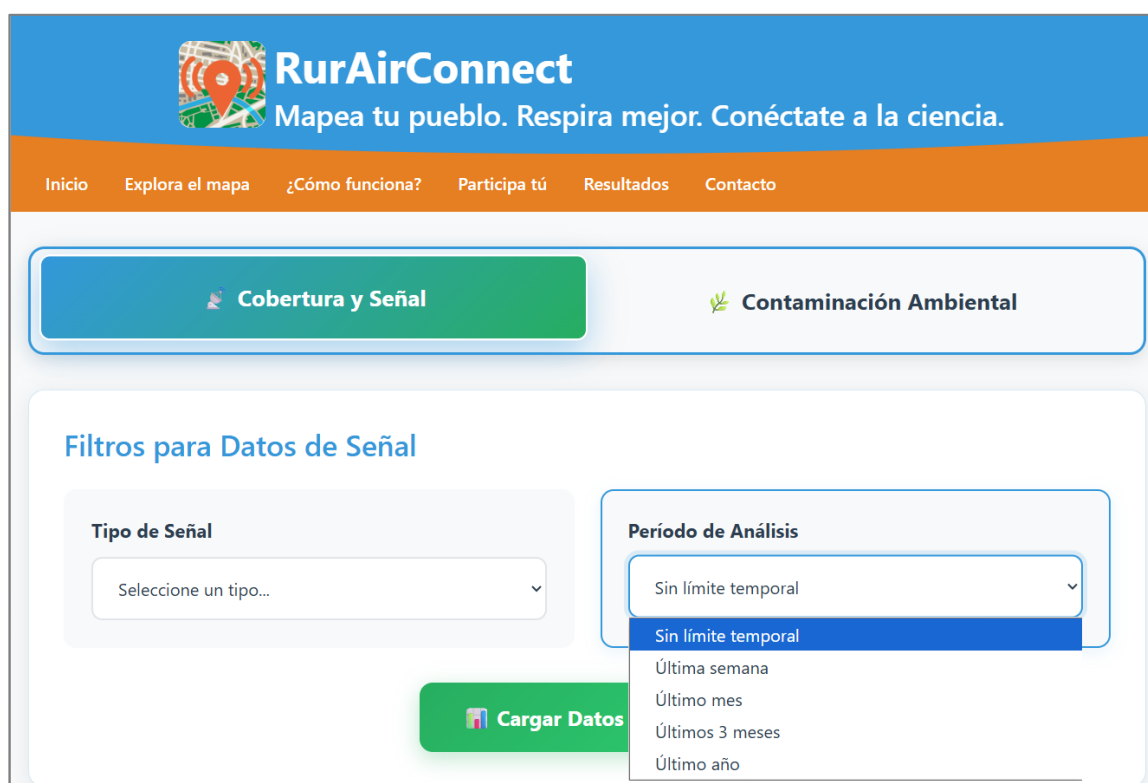


Figura 19. Interfaz de filtros para datos de señal móvil.

La Figura 20 muestra la interfaz de configuración de filtros para la categoría de Contaminación Ambiental, donde se aprecian los campos de selección de contaminante, periodo de análisis y agrupación temporal. Esta estructura modular permite adaptar la visualización a distintos contextos sin requerir conocimientos técnicos por parte del usuario.

The screenshot displays the RurAirConnect web application. At the top, there is a blue header with the logo and the text 'RurAirConnect' and 'Mapea tu pueblo. Respira mejor. Conéctate a la ciencia.' Below the header is an orange navigation bar with links: 'Inicio', 'Explora el mapa', '¿Cómo funciona?', 'Participa tú', 'Resultados', and 'Contacto'. The main content area has a white background. On the left, there is a button labeled 'Cobertura y Señal' with a signal icon. On the right, there is a green button labeled 'Contaminación Ambiental' with a leaf icon. Below these buttons is a section titled 'Filtros para Datos de Contaminación'. This section contains three dropdown menus: 'Contaminante' (with the text 'Seleccione un contaminante'), 'Período de Análisis' (with the text '3 meses'), and 'Agrupación Temporal' (with options 'Por día (recomendado)', 'Por día (recomendado)', 'Por semana', and 'Por mes (no recomendado)'). Below the dropdowns is a green button labeled 'Cargar Datos de Contaminación' with a leaf icon.

Figura 20. Interfaz de filtros para el análisis de datos de contaminación ambiental

4.2.5.1 Visualización de datos de cobertura móvil

Los datos de señal móvil se representan mediante gráficos de barras, que muestran la intensidad media por operador y provincia. Esta visualización facilita el análisis comparativo entre proveedores de red en distintas zonas geográficas, destacando diferencias de cobertura que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Los colores están codificados por operador, y cada barra representa la media de intensidad en dBm para la provincia seleccionada.

La interfaz se adapta automáticamente a diferentes tamaños de pantalla, utilizando abreviaciones de los nombres de operadores en dispositivos móviles para mantener la legibilidad sin sacrificar la información esencial. Además, al situar el cursor sobre cada barra del gráfico, se muestran mensajes emergentes que ofrecen detalles adicionales, como indicadores de calidad y fiabilidad de las mediciones, como se puede apreciar en la Figura 21. En este caso concreto, se muestra la intensidad de la cobertura móvil 4G en Zamora, y se observa que, a excepción del operador Movistar, del que en el momento de la visualización de los datos solo se disponían de medidas en el casco urbano, los valores de intensidad de los operadores son bastante similares. Cabe volver a remarcar que esta

visualización agrega datos provinciales, de manera que la ubicación de los datos obtenidos que se puede consultar en el mapa es relevante para dotar de contexto a estas gráficas.

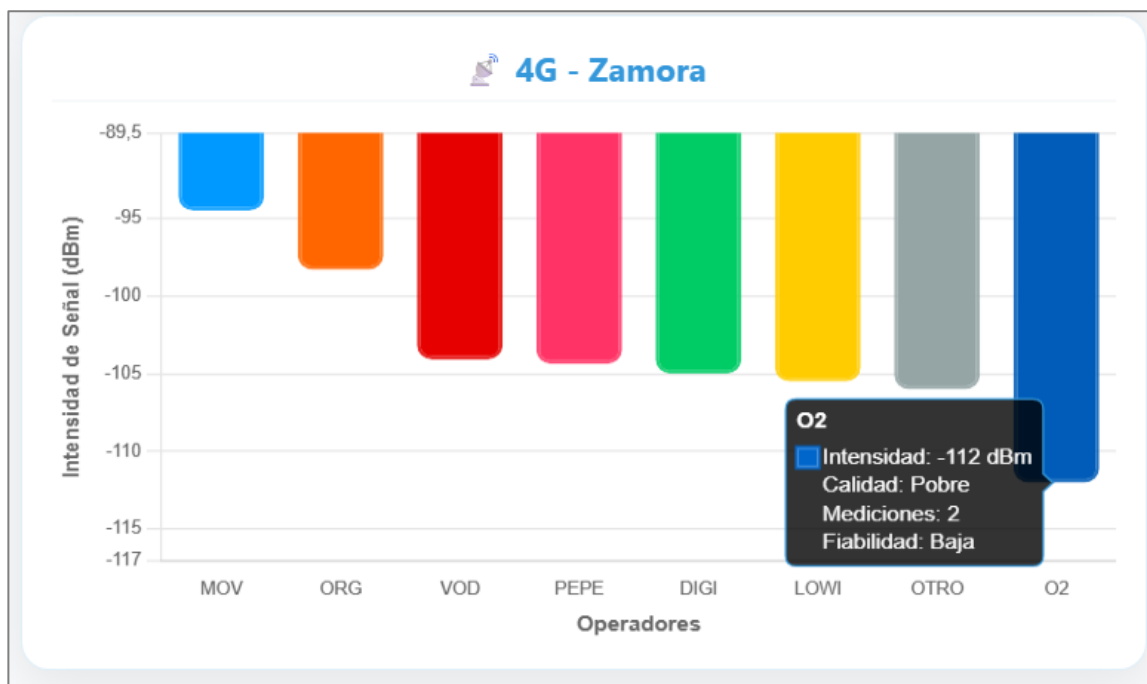


Figura 21. Gráfico de barras sobre cobertura móvil en la provincia de Zamora: intensidad media por operador

4.2.5.2 Visualización de datos de contaminación atmosférica

Para el análisis temporal de la contaminación atmosférica, se emplean gráficos de líneas que muestran la evolución de las concentraciones por provincia a lo largo del tiempo seleccionado. Esta representación permite identificar tendencias, picos de contaminación, variaciones estacionales y patrones temporales que pueden estar relacionados con factores climáticos, actividades industriales o eventos específicos.

Cada línea representa una provincia diferente, utilizando una paleta de colores distintivos que facilita la comparación entre territorios. El sistema maneja automáticamente la escala temporal, adaptándose al rango de fechas y la agrupación seleccionada. Las concentraciones se muestran en las unidades correspondientes a cada contaminante (ppm para gases, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para partículas). Una característica destacada es el manejo inteligente de múltiples series de datos. Cuando se analizan muchas provincias simultáneamente, el sistema implementa estrategias de visualización adaptativas: en pantallas pequeñas se simplifica la leyenda, mientras que en casos con gran cantidad de

datos se puede activar una leyenda externa interactiva que permite activar o desactivar provincias específicas para facilitar el análisis comparativo.

A continuación, en la Figura 22 se puede contemplar la visualización de una gráfica de contaminación que analiza el periodo temporal de 1 mes y con el funcionamiento de la ventana emergente al seleccionar un punto con datos.

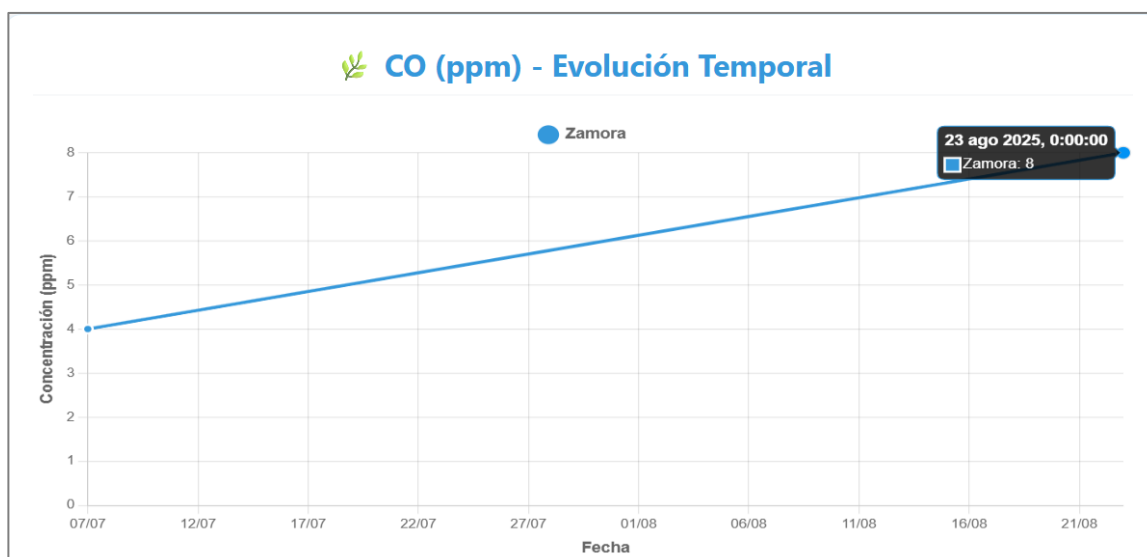


Figura 22. Gráfico sobre la variación de CO (ppm) en Zamora durante el periodo de análisis

A nivel técnico, los gráficos se generan mediante la biblioteca Chart.js, que permite construir representaciones dinámicas a partir de los datos agregados consultados en el servidor. En el caso de los contaminantes atmosféricos, se utiliza un gráfico de líneas donde cada serie representa una provincia, y los valores corresponden a las concentraciones registradas en el periodo seleccionado. El siguiente fragmento de código muestra un ejemplo simplificado de cómo se configura este tipo de gráfico, adaptando los datos recibidos y aplicando una escala temporal personalizada:

```
createPollutionLineChart(canvasId, chartData) {
  const ctx = document.getElementById(canvasId).getContext('2d');

  // Configurar datasets para cada provincia
  const datasets = Object.keys(provinceData).map((provincia, index) => ({
    label: provincia,
    data: provinceData[provincia].dates.map((date, i) => ({
      x: new Date(date),
      y: provinceData[provincia].values[i]
    })),
    borderColor: colors[index % colors.length],
  }));
```

```
        fill: false,
        tension: 0.4
    ));
    // Crear gráfico con escala temporal
    this.charts[canvasId] = new Chart(ctx, {
        type: 'line',
        data: { datasets },
        options: {
            scales: {
                x: {
                    type: 'time',
                    time: { unit: 'day', displayFormats: { day: 'dd/MM' } },
                    adapters: { date: luxon }
                }
            }
        }
    });
}
```

Este enfoque modular permite adaptar la visualización a distintos contaminantes, periodos y provincias sin modificar la estructura base del código. Además, el uso de Luxon para el formateo de fechas garantiza que las etiquetas temporales se presenten en un formato local comprensible, incluso en dispositivos móviles. A continuación, se muestra la integración entre Chart.js y Luxon.js, que permite configurar escalas temporales que se adaptan automáticamente al contexto de visualización:

```
time: {
    unit: groupBy === 'month' ? 'month' : 'day',
    round: groupBy,
    stepSize: monthsBack <= 3 ? 1 : 2,
    displayFormats: {
        day: isMobile ? 'dd-LLL' : 'dd/MM',
        week: 'dd/MM',
        month: 'LLL yyyy'
    }
},
adapters: {
    date: luxon
}
```

4.2.6 Sección de contacto

La sección de contacto de *RurAirConnect* ofrece un canal directo para que los usuarios puedan enviar consultas o comentarios relacionados con el funcionamiento de la plataforma. Su diseño se ha orientado a la simplicidad y accesibilidad, permitiendo enviar consultas, sugerencias o comentarios sin necesidad de conocimientos técnicos previos.

En la Figura 23 muestra una captura de esta sección, donde se aprecian los campos del formulario y el widget del sistema de verificación. El formulario incluye campos básicos, como nombre, apellidos, correo electrónico, asunto y mensaje, organizados de forma clara y con etiquetas descriptivas. Para garantizar la seguridad del sistema y evitar envíos automatizados, se ha integrado el servicio hCAPTCHA, que solicita una verificación manual antes de permitir el envío.

Figura 23. Sección de contacto: formulario de comunicación con verificación hCAPTCHA

Esta herramienta se implementa mediante un fragmento de código HTML que incorpora el widget de hCAPTCHA junto con una clave pública proporcionada por el servicio. La verificación se realiza en el navegador del usuario, sin almacenar datos personales relacionados con el proceso. Además de esta verificación externa, el formulario incorpora validaciones internas que garantizan la coherencia de los datos introducidos. Se comprueba que todos los campos obligatorios contengan contenido y que el correo

electrónico tenga un formato válido antes de permitir el envío. Estas validaciones se realizan en el cliente mediante expresiones regulares y controles de tipo, lo que permite ofrecer retroalimentación inmediata al usuario en caso de errores o campos incompletos.

4.3 Sistema de captura de datos

La recogida de datos por parte de los usuarios constituye uno de los pilares fundamentales de la plataforma *RurAirConnect*. Este sistema se ha diseñado para facilitar la participación ciudadana en la medición de cobertura móvil y calidad del aire en entornos rurales, mediante una solución digital accesible, modular y georreferenciada. La implementación se apoya en tecnologías ampliamente conocidas y utilizadas, como Google Forms, Google Apps Script y Google Sheets, que permiten una integración sencilla en la web y una experiencia fluida para el usuario final. La Figura 24 muestra el flujo del sistema de captura, desde la interacción del usuario en la página web hasta la inserción de los datos en la base de datos relacional, ilustrando las tecnologías que se han integrado y que se explican en las siguientes secciones.

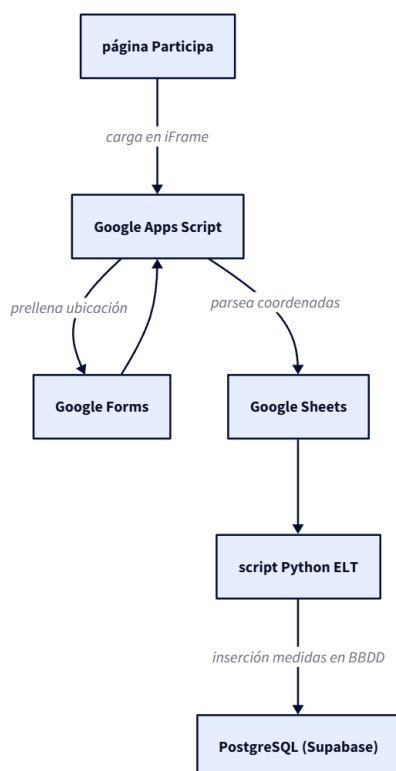


Figura 24. Diagrama de flujo del sistema de captura de datos

El sistema de captura se articula en torno a la sección “Participa tú” de la aplicación web, donde se presenta un formulario digital embebido que guía al usuario en la

introducción de datos. Este formulario está conectado con scripts de validación y procesamiento que garantizan la calidad de la información recogida, y con una base de datos relacional que permite su almacenamiento estructurado y su posterior análisis.

4.3.1 Integración del formulario en “Participa tú”

La sección “Participa tú” de la aplicación web actúa como punto de entrada para la participación ciudadana. En ella se ha integrado el formulario digital mediante un componente embebido en un *iframe* que carga una página web desarrollada y alojada en Google Apps Script. Esta aplicación personalizada es responsable de gestionar la lógica de geolocalización, mostrar el mapa interactivo, permitir la edición de coordenadas y redirigir al formulario de Google Forms con los datos prerrellenados.

El *iframe* se configura con el atributo `allow="geolocation"` para habilitar la captura automática de ubicación desde el navegador, siempre que el usuario otorgue los permisos correspondientes. El fragmento de código utilizado es el siguiente:

```
<iframe src="URL_DEL_FORMULARIO" allow="geolocation" width="100%"  
height="800px" frameborder="0"></iframe>
```

Este enfoque permite que el formulario se visualice directamente en la interfaz de la web, adaptándose de forma responsiva a distintos dispositivos (ordenadores, tablets, smartphones). La integración se ha realizado sobre una página servida mediante HTTPS, requisito indispensable para el funcionamiento de la API de geolocalización del navegador.

En la Figura 25 se muestra la visualización del componente embebido durante la carga inicial desde la versión de escritorio. De esta manera, cuando el usuario entra en la sección “Participa tú” de la web, tras una breve carga para que el navegador comunique la ubicación al fragmento, la visualización es la mostrada en la Figura 26, donde puede ver en el mapa la geolocalización detectada si ha funcionado todo bien, es decir, si está activada la geolocalización del dispositivo y el usuario da permisos al navegador para acceder a ella a la página web. Tal y como se observa, se muestra un mapa interactivo, con funcionalidades de *zoom* tanto con botones como con gestos en el smartphone, con el pop-up activo mostrando información sobre las coordenadas obtenidas.

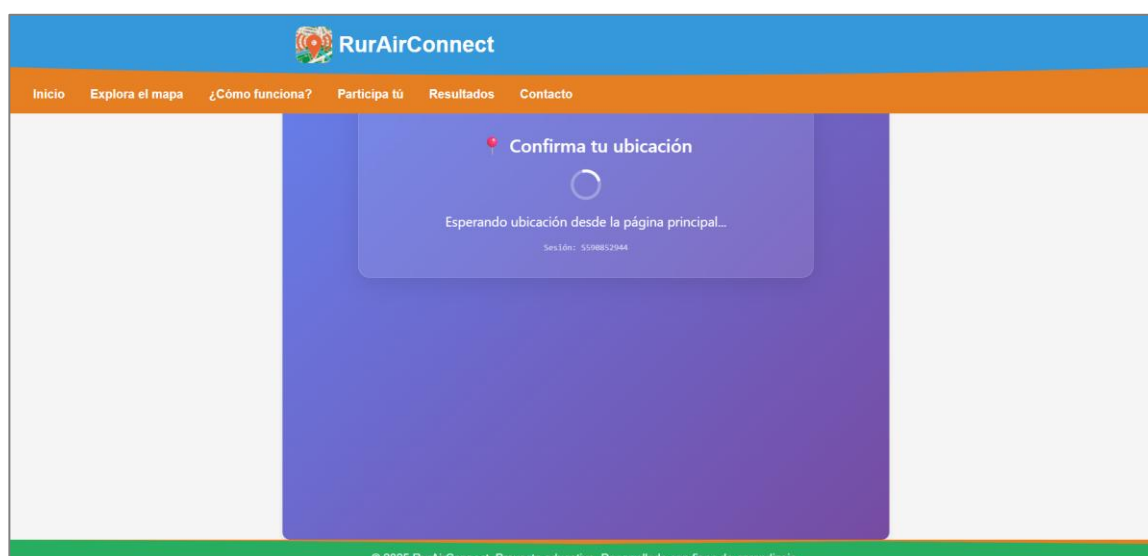


Figura 25. Vista del iframe embebido en la sección “Participa tú” esperando ubicación.

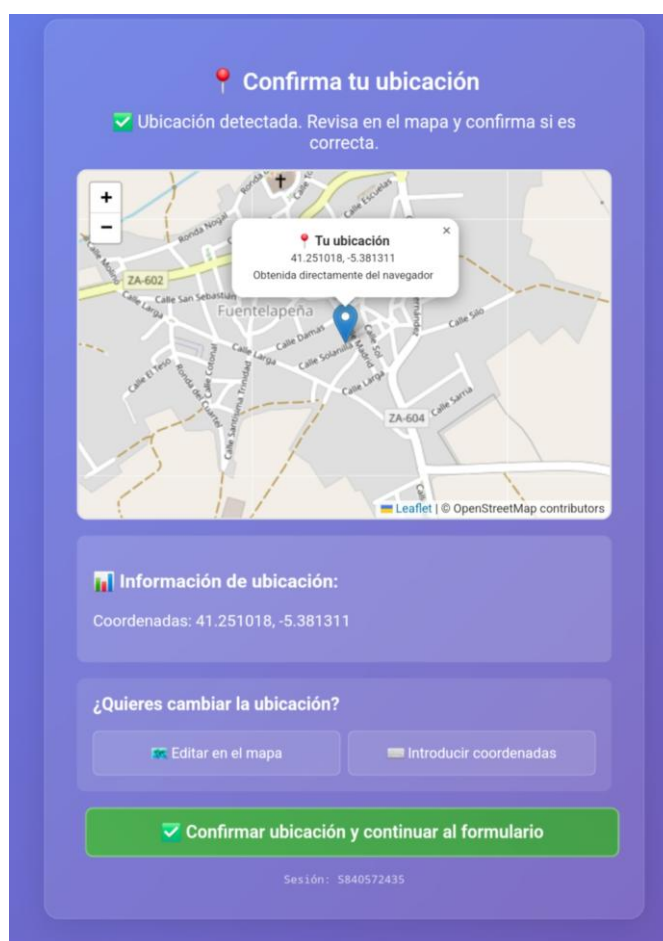


Figura 26. Visualización de la pantalla cuando la ubicación está activada y el usuario concede permisos de ubicación.

En función de cómo se hayan obtenido las coordenadas, se muestran los siguientes textos descriptivos:

- Obtenida directamente del navegador.
- Editada en el mapa.
- Introducida manualmente.
- Arrastra a tu ubicación actual. Este último texto se visualiza cuando no ha sido posible obtener la ubicación y se fuerza al usuario a modificarla en el mapa.

Se permiten dos maneras de edición de las coordenadas como se aprecia en la Figura 26, edición en el mapa e introducir coordenadas. La edición directa sobre el mapa se muestra en la Figura 27. Para indicar que está activa se cambia el marcador de color a rojo para indicar que se puede desplazar, pulsando y arrastrando para moverlo a la posición deseada. Para confirmar, basta con pulsar en el botón “Aplicar cambios” o si se quiere mantener la anterior, “Cancelar”. Tras aplicar los cambios se deshabilita la edición en el mapa, se actualizan las coordenadas en la interfaz y en la ventana emergente del marcador. Por el contrario, si se prefiere, se habilita la opción de introducir las coordenadas manualmente en un formulario como se muestra en la Figura 28.

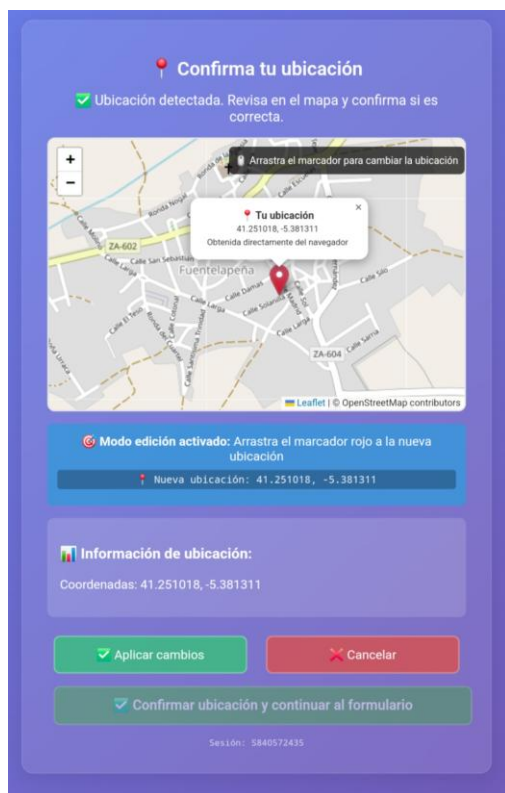


Figura 27: Vista de la edición en el mapa.

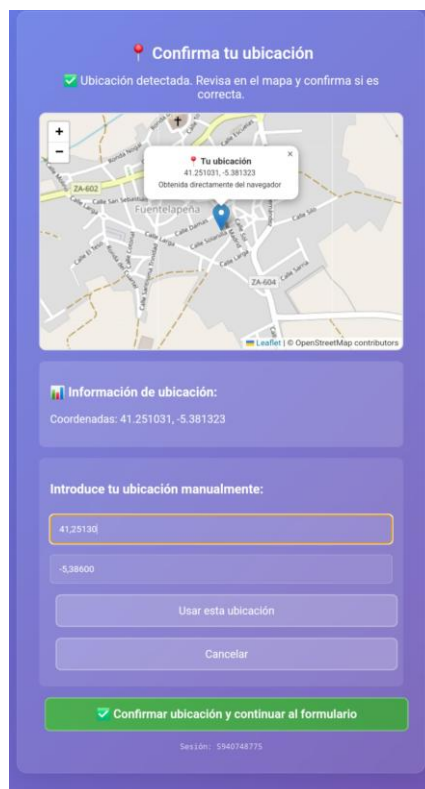


Figura 28. Vista mediante formulario.

Como no siempre el usuario va a tener la configuración necesaria habilitada o puede ocurrir algún problema en la carga de la ubicación, se plantea un *placeholder* o respaldo de ubicación, para que siempre haya una establecida. En este caso se ha definido en el centro de Valladolid. La vista que obtendría el usuario en este caso es la mostrada en la Figura 29 que se muestra a continuación. Visualmente el marcador es naranja y no se deja continuar al formulario hasta que el usuario no confirma la ubicación. Para ello, se entra directamente en modo de edición en el mapa, pudiendo manejar la posición con gestos en smartphone o con el ratón en escritorio, como en el caso anterior.

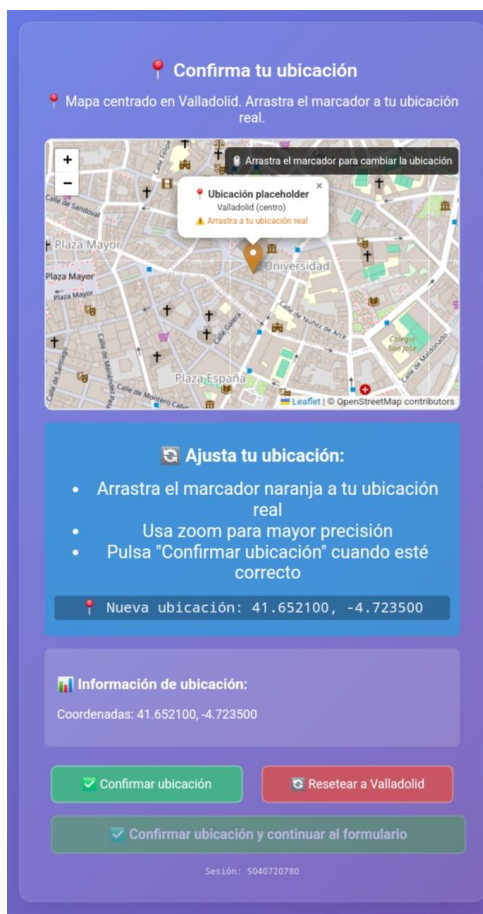


Figura 29. Vista de la web generada con Google Apps Script cuando no se puede obtener la geolocalización del usuario.

4.3.2 Comunicación de la ubicación al formulario Google Forms

Una vez el usuario está satisfecho con la geolocalización y la ha confirmado, se habilita el botón “Confirmar ubicación y continuar al formulario”, que lo que hace es prerrellenar el campo de Google Forms “LOCALIZACION” con las coordenadas introducidas y un identificador de sesión generado automáticamente al cargar la web generada con Google Apps Script. Para evitar problemas de duplicidades en ese id de sesión, se define que el formato es la cadena “S” + 9 dígitos + “_” + timestamp del momento en el que el usuario accede al formulario. A continuación, se muestra el código JavaScript que se encarga de la redirección, donde `confirmedLocation`, `FORM_URL` y `SESSION_ID` son constantes globales.

```
// CONFIRMAR Y PROCEDER AL FORMULARIO
function confirmAndProceed() {
  if (!confirmedLocation) {
    alert('No hay ubicación para confirmar');
```

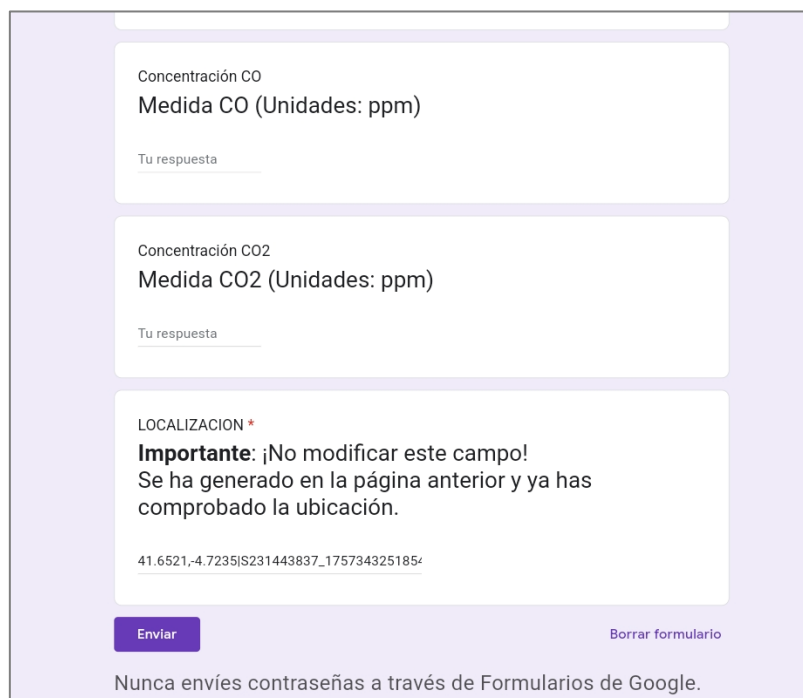
```
    return;
  }
  const { lat, lng } = confirmedLocation;
  // Crear timestamp único para el session ID
  const timestamp = Date.now();
  const uniqueSessionId = `\\${SESSION_ID}_${timestamp}\\`;

  // Formato: coordenadas|session_id_timestamp
  const locationData = `\\${lat},${lng} |\\${uniqueSessionId}\\`;
  // Actualizar UI para mostrar que se está procesando
  document.getElementById('status').innerHTML = 'Redirigiendo al formulario con tu ubicación confirmada...';
  document.getElementById('confirm-button').style.display = 'none';
  // Redireccionar al Forms con datos prefilled
  const formUrl = FORM_URL + encodeURIComponent(locationData);
  window.location.href = formUrl;
}, 1500);
}
```

Es importante destacar que en este caso FORM_URL es directamente la URL de prerrellenado del campo que nos interesa. Para obtenerla basta con pulsar sobre la opción “Rellenar previamente el formulario” disponible en la página de edición de nuestro formulario de Google Forms. Se abrirá una versión del formulario donde se pueden rellenar los campos, para posteriormente pulsar el botón “Obtener enlace” donde se permite copiar en el portapapeles el enlace con el identificador de los campos que hemos rellenado previamente. Este enlace tendrá este formato: https://docs.google.com/forms/d/e/IDENTIFICADOR_DE_NUESTRO_FORMULARIO/viewform?usp=pp_url&entry.24059564= mi_respuesta. Después solo es necesario borrar la cadena o valor que hayamos introducido en el campo y sustituirlo en la declaración de nuestra variable global.

A continuación, se presenta la Figura 30 donde se puede apreciar el campo ya prerrellenado después de que el usuario haya confirmado su ubicación anteriormente. Este método se eligió frente al uso de mecanismos de ejecución automática posteriores al envío del formulario (como los *triggers* o disparadores de Google Apps Script) porque ofrece mayor fiabilidad en entornos con múltiples usuarios concurrentes. Los triggers pueden fallar o no ejecutarse correctamente, lo que pone en riesgo la captura de datos como la ubicación. Al prerrellenar desde la URL, la información se integra antes del envío, evitando

pérdidas. Como limitación, cabe señalar que el usuario puede modificar manualmente el valor prerrellenado. Aunque este riesgo existe, se considera asumible en el contexto del proyecto, priorizando la estabilidad técnica y la trazabilidad de los datos.



The image shows a Google Form interface with three input fields. The first field is labeled 'Concentración CO' and 'Medida CO (Unidades: ppm)' with a pre-filled value of 'Tu respuesta'. The second field is labeled 'Concentración CO2' and 'Medida CO2 (Unidades: ppm)' with a pre-filled value of 'Tu respuesta'. The third field is labeled 'LOCALIZACION *' and contains a warning message: 'Importante: ¡No modificar este campo! Se ha generado en la página anterior y ya has comprobado la ubicación.' Below the warning is a pre-filled location string: '41.6521,-4.7235|S231443837_1757343251854'. At the bottom, there are two buttons: 'Enviar' (purple) and 'Borrar formulario' (light purple). A footer note states: 'Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.'

Figura 30. Ejemplo de campo prerrellenado en el formulario tras confirmar la geolocalización.

4.3.3 Estructura y campos del formulario Google Forms

El formulario digital ha sido configurado para recoger datos de intensidad de cobertura móvil y ambientales de forma estructurada y conjunta. Su diseño incluye campos obligatorios que garantizan la calidad mínima de cada entrada, así como elementos prerrellenados que permiten la trazabilidad geográfica y temporal de las mediciones.

La Figura 31 muestra el aspecto del formulario desde la perspectiva del usuario, incluyendo los campos visibles y las instrucciones asociadas. Se incluyen instrucciones más detalladas para los usuarios en el apartado “¿Cómo funciona?” de la página web mostrada en la sección anterior.

Cualquier persona puede participar, para ello puedes usar los siguientes métodos dependiendo del sistema operativo de tu móvil:

- iPhone:
Herramienta Field Test: Con el Wi-Fi apagado, desde la App de teléfono marca *3001#12345#* y pulsa el botón de llamada. Busca el parámetro **Reference Signal Received Power (RSRP)**, puede estar dentro de un submenú (LTE >Serving Cell Meas.)
- Android:
1. Desde Ajustes > Información de estado > Estado de la tarjeta SIM > Intensidad
2. Uso de Apps como Signal Strength o Netmonitor

rurairconnect@gmail.com [Cambiar de cuenta](#)

No compartido

* Indica que la pregunta es obligatoria

OPERADOR *

☐ MOVISTAR
☐ ORANGE
☐ VODAFONE
☐ LOWI
☐ YOIGO
☐ O2
☐ PEPEPHONE
☐ DIGI
☐ OTRO

Intensidad 4G *

Introduce la intensidad de la señal en dBm (Recuerda comprobar que no está 5G activo)

Tu respuesta

Intensidad 5G

Figura 31. Vista de la parte superior del formulario Google Forms con breves instrucciones y campos iniciales

Aunque el formulario completo incluye más campos, esta captura permite ilustrar la estructura general y el enfoque guiado del sistema. El resto de los campos, como la intensidad de señal 5G, operador móvil y campos relacionados con la concentración de contaminantes, se muestran a continuación en la Tabla. 3

Nombre del campo	Tipo de dato	Obligatorio
Operador	Texto (selección única – radio button)	Sí
Intensidad 4G	Numérico (entero)	Sí
Intensidad 5G	Numérico (entero)	No
Concentración PM 2.5	Numérico (entero)	No
Concentración PM 10	Numérico (entero)	No
Concentración CO	Numérico (entero)	No
Concentración CO ₂	Numérico (entero)	No
Localización	Texto (latitud,longitud SESSION ID)	Sí - Prerrellenado

Tabla 3. Campos del formulario Google Forms y características técnicas

Dado que no siempre hay disponible cobertura de señal 5G en todas las zonas rurales y que los contaminantes que puede medir el usuario dependen del instrumental que tenga disponible, se ha decidido dejar estos datos como opcionales para poder integrar de manera más democrática el mayor número de medidas posible.

Una vez enviado, cada registro se almacena automáticamente en una hoja de cálculo vinculada al formulario, donde se recopilan tanto las respuestas del usuario como los metadatos técnicos generados previamente, como se puede apreciar en la Figura 32. Esta hoja actúa como repositorio intermedio para la validación y el análisis de los datos antes de su inserción en la base de datos principal. Además, al estar alojada en Google Drive, proporciona una copia de seguridad automática y accesible, con una capacidad de almacenamiento que difícilmente se verá comprometida por el volumen de datos previsto en el proyecto.

Marca temporal	OPERADOR	Intensidad 4G	Intensidad 5G	Concentración PM 2.5	Concentración PM 10	Concentración CO	Concentración CO2	LOCALIZACION	SESSION ID	COORDENADAS LIMPIAS
23/08/2025 2:30:33	VODAFONE	-93	-101					41.5963415,-5.863631	S37258563_73	41.5963415,-5.863635
23/08/2025 2:32:50	PEPEPHONE	-96	-97	14	21	0	406	41.5962564,-5.863954	S37223002_21	41.5962564,-5.863954
23/08/2025 3:00:14	VODAFONE	-102	-108	15	20	0	461	41.5029213,-5.739361	S37223002_21	41.5029213,-5.739362
23/08/2025 3:00:16	PEPEPHONE	-114	-104	14	20	0	450	41.5029213,-5.739361	S90112099_34	41.5029213,-5.739362
23/08/2025 3:09:26	PEPEPHONE	-107	-106	14	19	0	400	41.5148093,-5.739101	S37258563_73	41.5148093,-5.739108
23/08/2025 3:09:28	VODAFONE	-97	-95	14	19	0	405	41.5148093,-5.739101	S37223002_21	41.5148093,-5.739108
23/08/2025 22:27:23	PEPEPHONE	-110	-113					41.251026,-5.381151	S90112099_34	41.251026,-5.381151
23/08/2025 22:32:13	PEPEPHONE	-110						40.4167279,-3.703291	S37258563_73	40.4167279,-3.703290

Figura 32. Hoja de cálculo con una muestra de las respuestas recogidas

4.3.4 Integración con la base de datos

Una vez recogidos los datos mediante el formulario digital, estos se almacenan temporalmente en una hoja de cálculo vinculada en Google Sheets. Desde allí, se inicia el proceso de integración con la base de datos relacional del proyecto, diseñada en PostgreSQL con extensión PostGIS para soporte geoespacial. Esta integración se realiza mediante un script desarrollado en Python, que puede ejecutarse de forma manual o mediante tareas programadas (cron jobs) según las necesidades operativas del sistema.

El script accede a la hoja de cálculo a través de una URL de exportación directa, que genera un archivo CSV con todas las respuestas registradas hasta el momento. Este archivo actúa como repositorio intermedio, permitiendo aplicar controles de calidad antes de incorporar los datos al sistema principal. Dado que los datos pueden contener caracteres especiales propios del idioma español (como tildes o eñes), el sistema incorpora un mecanismo robusto de detección de codificación. Se prueban múltiples formatos estándar (UTF-8, UTF-8-SIG, Latin1, CP1252, ISO-8859-1) hasta identificar una codificación válida. En casos excepcionales, se aplica una limpieza manual de caracteres malformados para asegurar la continuidad del procesamiento.

Se aplica un enfoque de validación progresiva, estructurado en capas que permiten filtrar errores y transformar los datos en información científicamente utilizable. Las principales validaciones implementadas son:

- Validación de campos obligatorios: se verifica que todos los campos requeridos estén presentes y correctamente formateados, incluyendo la marca temporal, el operador móvil, las coordenadas geográficas y al menos una medición válida (de señal o contaminante).
- Validación geográfica: se comprueba que cada punto esté ubicado dentro del territorio español, utilizando geometría oficial descargada dinámicamente desde el servicio WFS (*Web Feature Service*) del Instituto Geográfico Nacional. Esta geometría se almacena en memoria durante la ejecución para optimizar el rendimiento en lotes de gran tamaño.
- Control de duplicados: se comparan coordenadas, marca temporal y operador móvil con tolerancias definidas para evitar registros redundantes. La detección considera variaciones menores en la precisión GPS (hasta 8 decimales) y diferencias temporales de hasta 60 segundos, actualizando registros existentes en lugar de generar duplicados.

Para ilustrar como se realiza la validación geográfica, se muestra a continuación un fragmento representativo del código utilizado, donde usando la librería *geopandas* se realiza la descarga de la geometría del territorio nacional y se comprueba si el punto a analizar está contenido en ella:

```
def is_point_in_spain(lat: float, lon: float) -> bool:
    """Verifica si un punto está dentro del territorio español"""
    SPAIN_WFS_URL = (
        "https://contenido.ign.es/wfs-inspire/unidades-administrativas"
        "?service=WFS&request=GetFeature&COUNT=1&version=2.0.0"
        "&TYPENAME=au:AdministrativeUnit"
        "&resourceid=AU_ADMINISTRATIVEUNIT_34000000000"
        "&srsName=EPSG:4326"
    )
    gdf = gpd.read_file(SPAIN_WFS_URL)
    spain_geom = gdf.geometry.iloc[0]
    punto = Point(lon, lat)
    return spain_geom.contains(punto)

def is_point_in_spain(lat: float, lon: float) -> bool:
    punto = Point(lon, lat)
```

```
return spain_geom.contains(punto)
```

Una vez completadas las validaciones iniciales, el sistema ejecuta un flujo de procesamiento que transforma los datos recogidos en información estructurada y trazable. Este flujo incluye la verificación de mediciones, el tratamiento de coordenadas geográficas y la inserción controlada en la base de datos. La Figura 33 resume este proceso, desde la recepción de los datos en el formulario hasta su almacenamiento definitivo en PostgreSQL.

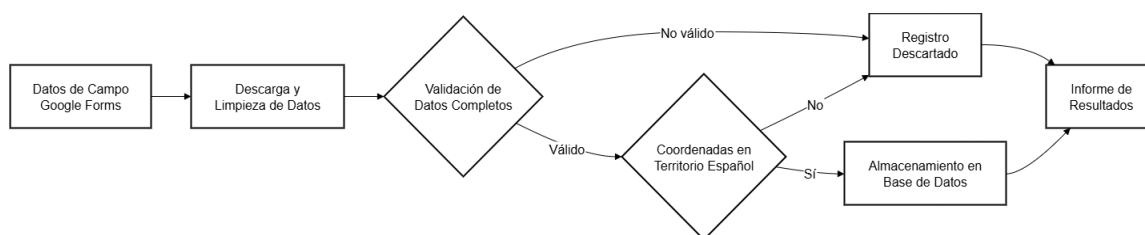


Figura 33. Diagrama de la estructura condicional del sistema de validación de datos

Antes de proceder a la inserción de los datos, el sistema aplica un procesamiento específico en función del tipo de dato recogido. En el contexto de *RurAirConnect*, se distinguen principalmente dos categorías: mediciones de cobertura móvil y mediciones de calidad del aire. Cada una requiere transformaciones adaptadas a su naturaleza técnica y a los estándares de interpretación posteriores. En el caso de las telecomunicaciones, se verifica que el tipo de señal esté correctamente especificado, ya sea 4G o 5G. Las intensidades de señal, que suelen registrarse como valores negativos en decibelios (dBm), se convierten a enteros para facilitar su tratamiento y análisis. Para las mediciones de calidad del aire, el procesamiento incluye validación de tipos de contaminante (PM2.5, PM10, CO, CO2) contra el catálogo de referencia, conversión de concentraciones utilizando la clase Decimal de Python para mantener precisión en mediciones científicas, y validación básica que garantiza que las concentraciones no sean negativas.

Una vez procesados y validados, los datos se insertan en la base de datos relacional mediante un mecanismo que evita duplicidades y garantiza la consistencia del sistema. Para ello, se utiliza la cláusula `ON CONFLICT` de PostgreSQL, que permite actualizar registros existentes si coinciden en ciertos campos clave, como la ubicación y la marca temporal. Este enfoque resulta especialmente útil en sesiones repetidas o en registros que se generan con ligeras variaciones.

Cada inserción incluye metadatos de trazabilidad que registran la fuente de datos ('forms'), el método de medición ('mobile' para telecomunicaciones, 'domestic_sensor' para

calidad del aire), y señalización de calidad automática (*'valid'* para datos que pasan todas las validaciones).

Además, el sistema genera un registro detallado (*log*) con cada ejecución del script de procesamiento. Este log documenta las operaciones realizadas, los errores detectados y las estadísticas del flujo de datos. Al finalizar cada ejecución, se genera un informe automático que incluye métricas clave como el número total de registros procesados, la proporción de sesiones nuevas frente a actualizadas, la distribución por tipo de medición y la categorización de errores (por ejemplo, campos incompletos, coordenadas inválidas u operadores desconocidos).

Este sistema automatizado permite gestionar los datos de forma estructurada y coherente, aplicando validaciones técnicas en cada etapa del proceso. La incorporación de trazabilidad facilita el seguimiento de cada registro, desde su captura hasta su inserción en la base de datos, y permite evaluar el comportamiento del sistema en distintos escenarios de uso. Esta estructura contribuye a mejorar la calidad del conjunto de datos y a garantizar su utilidad en análisis posteriores.

4.4 Diseño e implementación de la base de datos

Para gestionar de forma eficiente la información recopilada por los usuarios de *RurAirConnect*, se ha diseñado una base de datos relacional. Esta estructura permite almacenar datos geográficos, temporales y categóricos con precisión, manteniendo la escalabilidad necesaria para el crecimiento del sistema.

La solución implementada se basa en PostgreSQL, un sistema robusto y ampliamente empleado en entornos profesionales. Para realizar el tratamiento de datos espaciales se ha incorporado la extensión PostGIS, que añade funcionalidades específicas para trabajar con coordenadas, geometrías y consultas geoespaciales.

La base de datos se ha desplegado en Supabase, una plataforma que ofrece una instancia gestionada de PostgreSQL. Esta elección responde a las necesidades concretas del proyecto: gestionar ubicaciones geográficas precisas, procesar grandes volúmenes de mediciones distribuidas en el tiempo y ofrecer respuestas rápidas para su visualización en la web. Además, Supabase incorpora herramientas integradas como APIs automáticas y sistemas de autenticación. Estas funcionalidades han contribuido a simplificar el desarrollo de la aplicación, reduciendo la necesidad de implementar soluciones adicionales y

facilitando la integración con otros componentes del sistema. No obstante, la arquitectura permite, en cualquier momento, desplegar la base de datos en un servidor propio dedicado, sin que ello suponga una reestructuración significativa.

En las siguientes secciones se describen el modelo de datos diseñado, la estructura de las tablas y sus relaciones, las estrategias de optimización para consultas geoespaciales y los procedimientos y vistas que sirven de puente con la aplicación web.

4.4.1 Modelo de datos relacional

El punto de partida fue la definición de un modelo relacional normalizado que garantizara la consistencia de la información. Tras el proceso de diseño, la base de datos se diseñó siguiendo la Tercera Forma Normal (3FN), lo que significa que cada tabla dispone de una clave primaria única, todos sus atributos son atómicos, y no existen dependencias parciales ni transitivas entre atributos. Esta normalización se traduce en un modelo modular, organizado en tres bloques. En primer lugar, las tablas de catálogo (`operators`, `signal_types` y `pollutant_types`) funcionan como diccionarios que otorgan significado a los códigos manejados en el sistema. En segundo lugar, la tabla central `measurement_sessions` recoge el contexto de cada conjunto de mediciones: la localización geográfica exacta, la fecha y hora, el operador móvil detectado y la calidad de la señal GPS. Por último, las tablas especializadas `signal_measurements` y `pollutant_measurements` almacenan los valores concretos, vinculados siempre a una sesión válida y a las categorías definidas en los catálogos. De este modo, el modelo no solo asegura integridad referencial, sino que además resulta flexible, ya que es posible incorporar nuevos contaminantes o tecnologías de señal sin alterar la estructura existente.

4.4.2 Estructura de tablas y relaciones

La organización de estas entidades se representa en la Figura 34, que muestra el diagrama entidad-relación del sistema. En dicho diagrama puede observarse cómo las tablas de catálogo se sitúan en los márgenes, actuando como referencia, mientras que `measurement_sessions` ocupa el centro del modelo, enlazando con las mediciones concretas de señal y contaminantes. Esta disposición refleja el flujo natural de los datos: primero se define el contexto de la sesión (dónde y cuándo se mide, con qué operador), y a continuación se registran los valores recogidos.



Figura 34. Diagrama de Entidad-Relación de la base de datos

Las claves primarias y foráneas constituyen la columna vertebral de este diseño. Cada tabla de catálogo, `operators`, `signal_types` y `pollutant_types`, dispone de una clave primaria simple, habitualmente un identificador numérico de tipo `serial` o `integer`. Estas claves se utilizan como referencias en las tablas dinámicas, de modo que, por ejemplo, cada medición de señal está obligatoriamente asociada a un operador válido y a un tipo de señal previamente definido.

En tabla `operators` contiene el nombre comercial de cada operador, así como campos de control de versiones (`created_at` y `updated_at`) y un campo de estado que permite activar o desactivar el operador. La aplicación solo muestra las medidas cuyo operador está activo.

Las tablas de catálogo `signal_types` y `pollutant_types` son muy similares, ambas recogen el nombre del tipo de señal y de contaminante respectivamente. Incluyen los mismos campos de control de versiones comentados anteriormente, y de la misma manera, incorporan un campo que permite tener en cuenta o no contaminantes o

señales concretas en la visualización de la aplicación. Como campo añadido, `pollutant_types` incorpora las unidades de medida, de manera que resulte más fácil a la hora de actualizar visualmente los componentes visuales ya descritos anteriormente.

La tabla `measurement_sessions`, por su parte, también cuenta con una clave primaria propia, que se convierte en el nexo común del resto de las tablas de mediciones. Gracias a esta estructura, cualquier dato recogido queda inequívocamente vinculado con la sesión en la que fue generado, lo que facilita tanto la trazabilidad como la consistencia.

Esta tabla central incorpora los datos del operador, la localización geográfica y el momento en el que la medición fue comunicada por el usuario final.

Las tablas específicas de mediciones, `signal_measurements` y `pollution_measurements`, tienen campos muy similares, siendo los más importantes el tipo de señal o contaminante, que se relaciona con las tablas catálogo, y el valor numérico de intensidad o concentración. De la misma manera que en tablas anteriores, se incluyen campos de auditoría (*`created_at`* y *`updated_at`*) que son actualizados automáticamente. Se han incluido campos previendo una posible expansión de la plataforma, donde se permite etiquetar el origen de los datos, por si se quisieran introducir datos de fuentes oficiales, así como marcar datos como inválidos si se detectan valores erróneos.

El uso de claves foráneas no solo garantiza la integridad referencial, sino que también permite establecer relaciones jerárquicas claras entre las entidades. Así, una medición de partículas PM2.5 no puede existir si no está asociada a una sesión, y esa sesión a su vez no puede desligarse de un operador ni de un lugar en el espacio y el tiempo. Este enfoque asegura que no haya registros huérfanos ni inconsistencias, y facilita la posterior explotación analítica.

El diagrama pone también de manifiesto otra característica importante: la separación entre catálogos estables y datos dinámicos. Mientras que las tablas de operadores o tipos cambian muy poco y actúan como marcos de referencia, las sesiones y mediciones están pensadas para crecer indefinidamente a medida que se amplía la recogida de datos. Este diseño ayuda a mantener la eficiencia incluso cuando el volumen de información se incrementa de manera significativa, ya que los catálogos sirven como

puntos de anclaje fijos y las tablas dinámicas pueden escalar sin comprometer la coherencia global.

Por último, hay una tabla que no está relacionada directamente con el resto, pero que adquiere relevancia de cara a la generación de gráficas de resultados se emplea para agrupar los datos. Se trata de la tabla `provincias_cyl`, que contiene en la geometría de las provincias de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, los códigos de referencia del INE (Instituto Nacional de Estadística), así como su centro geográfico, almacenando por separado su latitud y su longitud.

4.4.3 Optimización para consultas geoespaciales

La eficiencia en la ejecución de consultas geográficas y temporales ha sido uno de los principales retos técnicos del proyecto. Para abordar esta cuestión, se han aplicado diversas técnicas de modelado y optimización sobre la base de datos, con el objetivo de reducir los tiempos de respuesta y mejorar la escalabilidad del sistema.

Una de las claves para lograr este rendimiento reside en el uso adecuado de índices. En PostgreSQL, los índices son estructuras auxiliares que permiten acelerar el acceso a los datos, evitando búsquedas secuenciales completas sobre las tablas. El sistema ofrece distintos tipos de índices según el tipo de datos y las operaciones más frecuentes. Los índices B-Tree son los más utilizados y resultan especialmente eficaces en búsquedas por igualdad o por rango sobre campos numéricos o textuales [56].

En el contexto geoespacial, la extensión PostGIS introduce índices especializados como GiST (*Generalized Search Tree*), que permiten organizar datos geométricos en estructuras como árboles R-Tree. Estos índices optimizan la ejecución de consultas espaciales complejas, ya que el sistema puede descartar rápidamente grandes bloques de datos que no cumplen las condiciones espaciales. Gracias a ello, operaciones que de otro modo requerirían recorrer millones de filas pueden resolverse en milésimas de segundo, mejorando significativamente el rendimiento en entornos con grandes volúmenes de información geográfica [57].

La base de datos de *RurAirConnect* almacena cada sesión de medición con coordenadas de latitud y longitud, además de un campo de tipo `geometry`. Este diseño permite utilizar funciones espaciales avanzadas, como el cálculo de distancias o la

verificación de inclusión en áreas definidas. Al delegar estas operaciones en el motor de base de datos, se evita realizar cálculos manuales en el código de la aplicación, lo que mejora la eficiencia y reduce la complejidad del backend.

Para abordar la dispersión natural de las mediciones ciudadanas, que rara vez coinciden en las mismas coordenadas exactas, se implementó un sistema de cuadrícula espacial. Todas las observaciones que caen dentro de una celda de 10×10 metros se agrupan en un punto representativo. Este tamaño fue seleccionado tras pruebas piloto, ya que proporciona un equilibrio adecuado entre la precisión local y la agregación de datos, evitando una fragmentación excesiva que dificultaría el análisis. Complementariamente, se definieron índices espaciales y espaciotemporales, en particular de tipo GiST, que permiten ejecutar consultas que combinan criterios geográficos y temporales con mejoras sustanciales en el rendimiento. Por ejemplo, consultas como “todas las mediciones de partículas PM2.5 en la provincia Valladolid durante los últimos 3 meses” se resuelven en décimas de segundo, frente a los varios segundos que requerirían sin optimización.

Finalmente, se incorporó una validación territorial que descarta cualquier coordenada situada fuera de los límites administrativos de España. Esta medida mejora la calidad de los datos y evita que el sistema dedique recursos a procesar registros irrelevantes. En conjunto, estas estrategias de modelado e indexación garantizan que la base de datos mantenga un rendimiento adecuado incluso ante volúmenes crecientes de información, asegurando la escalabilidad y robustez de la aplicación web.

4.4.4 Procedimientos y vistas para la aplicación web

Una vez optimizada la estructura interna de la base de datos, el siguiente paso consistió en facilitar su integración con la aplicación web, permitiendo consultas rápidas, seguras y adaptadas a las necesidades del cliente. Para ello, se desarrollaron vistas y funciones SQL que encapsulan la lógica más habitual, evitando que el frontend tenga que ejecutar operaciones complejas o costosas directamente sobre las tablas.

Las vistas de agregación espacial, como `vista_signal_grid_10m` y `vista_pollution_grid_10m`, presentan los datos ya agrupados por celdas de 10×10 metros. Este enfoque permite representar la información en mapas sin necesidad de procesar miles de puntos individuales en el navegador, lo que mejora significativamente el rendimiento y la experiencia de usuario.

Complementariamente, se diseñaron funciones estadísticas que devuelven datos preparados para alimentar directamente las visualizaciones gráficas. Funciones como `get_signal_stats_charts()` o `get_pollution_temporal_charts()` generan promedios, distribuciones y series temporales en formato JSON, facilitando la integración con librerías como Chart.js sin necesidad de realizar transformaciones adicionales en el cliente. La función `get_pollution_temporal_charts()`, por ejemplo, permite obtener series temporales de concentración de contaminantes por provincia, agrupadas por día, semana o mes. A continuación, se muestra un fragmento representativo de su estructura:

```
-- Función para generar gráficos temporales de contaminación por provincia
CREATE OR REPLACE FUNCTION get_pollution_temporal_charts(
    p_pollutant_code TEXT,
    p_months_back INTEGER DEFAULT 3,
    p_group_by TEXT DEFAULT 'day'
) RETURNS JSON AS $$
BEGIN
    RETURN (
        SELECT jsonb_build_object(
            'chart_type', 'line_chart',
            'pollutant_code', p_pollutant_code,
            'data', jsonb_agg(
                jsonb_build_object(
                    'fecha', fecha,
                    'provincia', provincia,
                    'avg_concentration', avg_concentration
                )
            )
        )
    )
    FROM (
        -- Subconsulta con agregación temporal y espacial
    ) temporal_stats
);
END;
$$ LANGUAGE plpgsql SECURITY DEFINER;
```

En cuanto a la seguridad, se implementó el sistema de *Row Level Security* (RLS) de PostgreSQL, que permite definir políticas de acceso diferenciadas por rol. Esta funcionalidad garantiza que los scripts encargados de cargar nuevos datos tengan permisos

de escritura restringidos, mientras que la aplicación web opera exclusivamente en modo lectura. De este modo, se protege la integridad del sistema frente a usos indebidos o posibles ataques externos. Este modelo de seguridad implementa el principio de menor privilegio, según el cual cada rol dispone únicamente de los permisos mínimos necesarios para desempeñar sus funciones específicas. Por ejemplo, el rol *python_script* tiene permisos para insertar y actualizar datos, pero no para eliminarlos; mientras que el rol *web_reader* se limita a realizar consultas de lectura. Esta configuración garantiza la integridad de los datos frente a accesos no autorizados o modificaciones indebidas. A continuación, se muestra un ejemplo de configuración de roles y activación de políticas de seguridad a nivel de fila RLS sobre la tabla *measurement_sessions*:

```
-- Declaración de roles con privilegios diferenciados
CREATE ROLE python_script [Contraseña];
GRANT INSERT, UPDATE ON ALL TABLES IN SCHEMA public TO python_script;

CREATE ROLE web_reader [Contraseña];
GRANT SELECT ON ALL TABLES IN SCHEMA public TO web_reader;

-- Activación de políticas RLS en tabla principal
ALTER TABLE measurement_sessions ENABLE ROW LEVEL SECURITY;
```

En conjunto, este ecosistema de vistas, funciones e índices dota a la base de datos de una gran eficiencia y robustez. Al mismo tiempo, proporciona a la aplicación web un acceso ágil, seguro y escalable a la información, cumpliendo con los objetivos técnicos definidos en la fase de diseño.

4.5 Limitaciones y observaciones

Durante el proceso de desarrollo y validación se han identificado diversas limitaciones técnicas y funcionales que, aunque no comprometen la operatividad del sistema para cumplir los objetivos específicos establecidos en este Trabajo de Fin de Grado, representan aspectos importantes a considerar tanto para la interpretación apropiada de los resultados obtenidos como para el desarrollo de futuras evoluciones del proyecto.

4.5.1 Restricciones geográficas y de alcance del proyecto

La limitación arquitectural más significativa del sistema desarrollado es su restricción específica al territorio español, incluyendo tanto la península ibérica como los archipiélagos balear y canario, pero excluyendo los territorios de ultramar. Esta decisión, implementada deliberadamente para acotar apropiadamente el alcance del Trabajo de Fin de Grado y simplificar aspectos técnicos complejos relacionados con la validación geográfica internacional, tiene implicaciones importantes que deben considerarse al evaluar los resultados del proyecto.

Esta restricción territorial se manifiesta de manera práctica en varias situaciones específicas. En primer lugar, las zonas fronterizas presentan un desafío particular, dado que mediciones realizadas en ubicaciones muy próximas a las fronteras nacionales podrían ser incorrectamente rechazadas debido a imprecisiones inherentes en los sistemas de geolocalización GPS, especialmente en dispositivos móviles de gama baja o en condiciones meteorológicas adversas.

La granularidad geoespacial implementada mediante cuadrículas de 10x10 metros, aunque proporciona precisión suficiente para la mayoría de los casos de uso contemplados en el proyecto, presenta limitaciones en escenarios específicos que merecen consideración. En áreas urbanas de alta densidad, esta granularidad puede resultar excesiva, generando múltiples puntos de medición muy próximos que, desde una perspectiva práctica de análisis de cobertura, representan esencialmente la misma ubicación funcional. Por el contrario, en extensas áreas rurales caracterizadas por variaciones topográficas significativas, la granularidad seleccionada podría resultar insuficiente para capturar variaciones importantes en la calidad de cobertura que ocurren en distancias relativamente cortas debido a obstáculos geográficos específicos como montañas, valles o masas de agua.

4.5.2 Limitaciones temporales y de procesamiento de datos

Una de las limitaciones más significativas del sistema actual desde el punto de vista operativo es la ausencia de capacidades de procesamiento y actualización en tiempo real. El proceso de sincronización desde Google Forms hacia la base de datos Supabase requiere la ejecución manual del script Python desarrollado para esta función, introduciendo una latencia variable e impredecible entre el momento en que los usuarios contribuyen con nuevos datos y su disponibilidad efectiva en la plataforma.

Esta limitación tiene implicaciones importantes para la experiencia del usuario y para la utilidad práctica del sistema. Los usuarios que contribuyen con mediciones no pueden verificar inmediatamente que sus datos han sido procesados correctamente, lo que puede generar incertidumbre sobre la efectividad de sus contribuciones y potencialmente desincentivar la participación continuada. Desde una perspectiva técnica, esta limitación también impide la implementación de funcionalidades avanzadas que podrían beneficiarse de datos actualizados, como sistemas de alerta temprana para condiciones ambientales adversas o análisis de tendencias en tiempo real.

La ventana temporal de 30 días implementada para datos ambientales, aunque justificada desde la perspectiva de mantener la relevancia práctica de la información mostrada, puede resultar limitante para ciertos tipos de análisis científicos. Esta restricción es particularmente notable para contaminantes atmosféricos que presentan variaciones estacionales marcadas, donde períodos de análisis más amplios podrían proporcionar insights significativamente más valiosos sobre patrones de contaminación a largo plazo. Adicionalmente, esta limitación impide la realización de estudios retrospectivos que podrían correlacionar eventos específicos de contaminación con condiciones meteorológicas particulares o actividades humanas específicas, aunque es fácilmente abarcable en el futuro.

4.5.3 Consideraciones sobre rendimiento y escalabilidad

Aunque el sistema demostró un funcionamiento adecuado durante las pruebas realizadas con los volúmenes de datos contemplados en el desarrollo del proyecto, existen incertidumbres importantes sobre su comportamiento bajo condiciones de uso intensivo que podrían encontrarse en un despliegue operativo a escala nacional. Las consultas espaciales complejas implementadas mediante PostGIS, aunque eficientes para los

conjuntos de datos de prueba, no han sido sometidas a pruebas exhaustivas con volúmenes de datos masivos que incluyan decenas o cientos de miles de registros simultáneos.

Esta limitación es particularmente relevante considerando que un despliegue exitoso del sistema a nivel nacional podría generar volúmenes de datos significativamente superiores a los contemplados durante la fase de desarrollo. Las consultas que involucran agregaciones espaciales complejas, filtros múltiples simultáneos y cálculos estadísticos podrían experimentar degradación significativa del rendimiento, afectando negativamente la experiencia del usuario final.

Desde el punto de vista de los recursos del navegador, la carga simultánea de grandes cantidades de marcadores en las visualizaciones cartográficas puede plantear desafíos en dispositivos con recursos computacionales limitados. Aunque el sistema de *clustering* implementado mitiga parcialmente este problema al reducir el número de elementos visuales mostrados simultáneamente, no elimina completamente la carga computacional subyacente asociada con el procesamiento y renderizado de grandes conjuntos de datos geoespaciales. Esta limitación es especialmente relevante para dispositivos móviles más antiguos o con especificaciones técnicas limitadas.

4.5.4 Limitaciones en la validación y calidad de los datos

El sistema desarrollado depende fundamentalmente de la precisión y honestidad de los datos proporcionados por usuarios voluntarios, lo que introduce vulnerabilidades importantes en términos de calidad y confiabilidad de la información procesada. Esta dependencia de datos proporcionados directamente por los usuarios significa que no existen mecanismos implementados para verificación cruzada o validación mediante fuentes autoritativas que permitan detectar sistemáticamente datos deliberadamente erróneos, mediciones realizadas con equipos inadecuadamente calibrados, o información proporcionada de manera malintencionada.

La ausencia de validación de equipos de medición representa otra limitación significativa que puede afectar la calidad de los datos recopilados. La plataforma no implementa mecanismos para validar o estandarizar los tipos de equipos utilizados para realizar mediciones ambientales o de señal móvil, lo que puede introducir variabilidad sistemática en los datos que no refleje diferencias reales en las condiciones medidas, sino

diferencias en la calidad, precisión o estado de calibración de los instrumentos utilizados por diferentes usuarios.

El sistema tampoco captura información contextual relevante que podría mejorar significativamente la interpretación y validez científica de los datos recopilados. Por ejemplo, las mediciones ambientales no incluyen información sobre condiciones meteorológicas prevalentes durante el momento de la medición, datos que podrían ser cruciales para interpretar correctamente los niveles de contaminación registrados. Similarmente, las mediciones de cobertura móvil no incluyen información sobre características del entorno inmediato, como tipo de edificación, densidad urbana, o presencia de obstáculos físicos que podrían influir significativamente en la calidad de la señal medida.

4.5.5 Limitaciones de interfaz y experiencia de usuario

Aunque la interfaz desarrollada cumple satisfactoriamente los requisitos básicos de usabilidad establecidos para el proyecto, no incorpora características específicas de accesibilidad que podrían ser importantes para usuarios con discapacidades diversas. La navegación mediante teclado, la compatibilidad con lectores de pantalla, y las opciones de alto contraste no han sido específicamente optimizadas, lo que podría limitar el acceso al sistema para usuarios con necesidades especiales de accesibilidad.

La implementación del sistema en idioma español, aunque apropiada y justificada para el contexto geográfico específico del proyecto (territorio español), podría presentar limitaciones de usabilidad para usuarios no hispanohablantes que residen en España o que visitan el país temporalmente. Esta limitación lingüística podría reducir la participación de ciertos segmentos de la población, potencialmente introduciendo sesgos en los datos recopilados que favorezcan áreas geográficas con mayor concentración de población hispanohablante.

Una de las limitaciones identificadas en el sistema es la ausencia de mecanismos de retroalimentación detallada hacia los usuarios respecto al estado de procesamiento de sus contribuciones. Actualmente, no se proporciona confirmación automática tras el envío de datos, ni información sobre cómo las mediciones individuales se integran en el conjunto global ni sobre su impacto en las visualizaciones y análisis disponibles en la plataforma.

4.5.6 Dependencias técnicas y consideraciones arquitecturales

La arquitectura actual del sistema presenta dependencias críticas de varios servicios externos (Google Forms para la recopilación inicial de datos, Google Sheets para el almacenamiento intermedio, y Supabase para la base de datos principal), introduciendo múltiples puntos de fallo potenciales que están fuera del control directo del sistema desarrollado. Interrupciones en cualquiera de estos servicios externos afectarían significativamente la funcionalidad de la plataforma, desde la recopilación de nuevos datos hasta la visualización de información existente.

Desde el punto de vista de la seguridad, aunque Supabase proporciona mecanismos robustos de autenticación y autorización, la aplicación frontend necesariamente expone ciertas claves de API que, aunque configuradas con permisos restrictivos apropiados, representan aspectos que deben considerarse cuidadosamente en términos de seguridad operacional. Esta exposición es técnicamente inevitable dada la arquitectura seleccionada, pero requiere monitorización continua y gestión apropiada para minimizar riesgos potenciales.

5

Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

Las principales conclusiones una vez finalizado este Trabajo Fin de Grado están relacionadas con el estado actual de la aplicación desarrollada y los objetivos alcanzados durante su implementación.

En primer lugar, se ha logrado diseñar e implementar con éxito una aplicación web funcional que cumple con los objetivos generales planteados. La plataforma desarrollada permite la recopilación de datos ciudadanos sobre intensidad de señal móvil y concentración de contaminantes atmosféricos, así como su posterior visualización de manera intuitiva y accesible para el público general. La arquitectura implementada, basada en tecnologías web estándar y herramientas de código abierto, demuestra ser una solución viable y escalable para proyectos de ciencia ciudadana.

La evaluación de dispositivos portátiles de bajo coste y elementos cotidianos como teléfonos móviles ha demostrado que es posible democratizar el acceso a la monitorización científica. Aunque estas mediciones no siguen la misma metodología ni cuentan con los recursos técnicos de las estaciones oficiales gestionadas por las administraciones públicas, los datos obtenidos con sensores domésticos muestran una tendencia coherente.

En general, durante las pruebas realizadas los valores registrados son ligeramente más elevados, lo que puede atribuirse a la mayor variabilidad e imprecisión de los dispositivos no profesionales y al hecho de que las medidas son puntuales y no obtenidas durante periodos de 8 horas. No obstante, esta diferencia no invalida su utilidad. Al contrario, la consistencia observada sugiere una correlación positiva con los datos oficiales, lo que los hace adecuados para estudios de tendencias y análisis comparativos.

Esta aproximación permite ampliar la cobertura territorial y facilita la participación ciudadana, reduciendo las barreras de entrada a proyectos científicos colaborativos.

Por otro lado, el sistema de visualización cartográfica desarrollado cumple satisfactoriamente con las especificaciones técnicas, implementando cálculos geoespaciales efectivos para la agregación de datos en coordenadas cercanas y proporcionando representaciones gráficas claras tanto a nivel de mapa interactivo como de análisis provincial. La funcionalidad de visualización diferenciada entre datos de operadores móviles y contaminantes atmosféricos permite una interpretación más precisa de la información recopilada. Sin embargo, se han identificado limitaciones importantes en el diseño actual. Existen restricciones significativas a la hora de visualizar los datos en tiempo real, ya que estos no son actualizados instantáneamente al no haber comunicación directa entre el formulario y la base de datos. Esta arquitectura requiere establecer un compromiso entre la sobrecarga del sistema, la frecuencia de peticiones y la novedad de los datos a la hora de decidir cada cuánto tiempo ejecutar el script Python de inserción de datos. No obstante, dado que los picos de carga se esperan puntuales y no se requieren actualizaciones en tiempo real estricto, el tiempo adicional de procesamiento permite implementar validaciones más robustas y un mayor control de calidad de los datos.

Por otra parte, se ha validado el correcto funcionamiento de esta primera versión de la aplicación web, donde se consigue el objetivo fundamental de mostrar a la ciudadanía los datos que han recogido previamente en un formato visual interactivo, proporcionando un primer análisis de resultados desde donde tomar conciencia y extraer conclusiones relevantes sobre la calidad del aire y cobertura móvil en zonas rurales.

La experiencia de desarrollo ha confirmado que el uso de tecnologías web estándar, aunque requiere más esfuerzo inicial de implementación, proporciona mayor control sobre el rendimiento de la aplicación y facilita el mantenimiento a largo plazo. La integración exitosa de servicios externos como Google Forms y Supabase demuestra la viabilidad de crear soluciones híbridas que aprovechan las ventajas de diferentes plataformas.

Finalmente, el proyecto ha establecido las bases técnicas y metodológicas necesarias para futuras expansiones, tanto en términos de funcionalidades como de cobertura geográfica, cumpliendo así con el objetivo de fomentar la participación

ciudadana en proyectos científicos relacionados con el medio ambiente y las telecomunicaciones.

5.2 Líneas futuras

Una posibilidad que se abre tras la realización de este trabajo, a la vista de los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas durante el desarrollo, es la implementación de mejoras técnicas y funcionales que podrían transformar significativamente la capacidad y alcance de la plataforma desarrollada.

La optimización del rendimiento del sistema constituye una línea prioritaria de desarrollo futuro, especialmente mediante la implementación de un sistema de caché de respuestas de base de datos que reduzca significativamente el consumo de recursos del servidor y minimice el número de consultas a Supabase. Esta mejora resultaría especialmente beneficiosa durante periodos de alta concurrencia de usuarios, mejorando los tiempos de respuesta de la aplicación y reduciendo los costes operativos asociados al uso de servicios externos. La implementación de técnicas de almacenamiento temporal permitiría servir datos frecuentemente solicitados sin necesidad de realizar consultas repetitivas a la base de datos.

El desarrollo de un formulario propio integrado representa una evolución natural del proyecto que eliminaría la dependencia actual de Google Forms y Google Sheets, proporcionando mayor control sobre el proceso de recopilación de datos y eliminando la posibilidad de que mediciones válidas sean descartadas debido a modificaciones inadecuadas de coordenadas o identificadores de sesión por parte de los usuarios. Esta independencia de servicios externos requeriría implementar medidas de seguridad robustas para prevenir vulnerabilidades como inyección SQL, validación de entrada de datos y autenticación de usuarios, pero proporcionaría una base más sólida para futuras expansiones del sistema.

La implementación de actualización en tiempo real constituye quizás la mejora más ambiciosa y transformadora posible. Esta funcionalidad requeriría desarrollar comunicación directa entre el formulario y la base de datos, eliminando los intermediarios actuales y permitiendo actualizaciones instantáneas de los datos recopilados. La implementación de *Server-Sent Events* (SSE) se considera más apropiada que WebSockets para este caso de uso específico, dado que el flujo de datos es principalmente

unidireccional desde el servidor hacia el cliente. Esta tecnología permitiría la actualización automática del mapa en tiempo real cuando se registren nuevas mediciones, creando una experiencia más dinámica e inmersiva para los usuarios que estén visualizando los datos.

La integración de fuentes de datos oficiales representa una línea de desarrollo valiosa que añadiría capas cartográficas con información procedente de datos abiertos de las Comunidades Autónomas y del Estado español. Esta funcionalidad permitiría contrastar y validar los datos ciudadanos con mediciones oficiales, proporcionando un contexto más completo y aumentando la credibilidad científica de la plataforma. La integración con APIs existentes como las utilizadas por portales especializados facilitaría este proceso y enriquecería significativamente el análisis comparativo entre mediciones ciudadanas y oficiales.

La expansión geográfica del proyecto más allá de Castilla y León hacia una cobertura nacional completa constituye otra línea de desarrollo natural que permitiría análisis comparativos entre diferentes regiones españolas. Esta ampliación incluiría la implementación de nuevas visualizaciones estadísticas y la adaptación de los algoritmos de agregación para manejar volúmenes de datos significativamente mayores, así como la incorporación de análisis específicos que consideren las particularidades climáticas y geográficas de cada región.

Adicionalmente, se podrían implementar funcionalidades avanzadas como un sistema de alertas automáticas que notifique cuando los niveles de contaminación superen umbrales establecidos en áreas específicas, desarrollo de modelos de análisis predictivo utilizando *machine learning* para predecir tendencias de calidad del aire basándose en datos históricos y variables meteorológicas, y la creación de una aplicación móvil nativa que facilite la recopilación de datos in situ mejorando la experiencia de usuario en dispositivos móviles.

La incorporación de elementos de gamificación podría incentivar la participación ciudadana continuada en la recopilación de datos, mientras que el desarrollo de una interfaz pública permitiría a terceros acceder a los datos recopilados para investigación académica y desarrollo de aplicaciones complementarias. Estas líneas futuras de desarrollo aseguran la evolución continua de la plataforma hacia una herramienta más robusta, completa y valiosa para la comunidad científica y la ciudadanía en general, manteniendo el espíritu

original de democratización del acceso a la información ambiental y de telecomunicaciones.

6

Bibliografía

- [1] CSIC, «Guía de Ciencia Ciudadana.,» 2022. [En línea]. Available: https://digital.csic.es/bitstream/10261/306282/3/Guia_Ciencia_Ciudadana_CSIC_2022.pdf. [Último acceso: septiembre 2025].
- [2] A. L.-Z. L. C. R. L. J. P. M. P. R. S. a. K. W. K. Vohland, *The Science of Citizen Science*, Springer Cham, 2021.
- [3] G. M. M. A. F. e. a. Hognogi, «The role of citizen science mobile apps in facilitating a contemporary digital agora.,» *Humanit Soc Sci Commun*, vol. 10, n° 863, 2023.
- [4] S. L. a. G. F. Fritz S, «The grand challenges facing environmental citizen science.,» *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, 2022.
- [5] D. e. a. Robinson, «Beyond Science: Exploring the Value of Co-created Citizen Science for Diverse Community Groups.,» *Citizen Science: Theory and Practice*, vol. 9, 2024.
- [6] J. e. a. Roche, «Citizen Science, Education, and Learning: Challenges and Opportunities.,» *Frontiers*, 2020.
- [7] J. Palomino Morales, «La Conectividad en el contexto rural. ¿Marginalidad digital?,» *Revista Scientific*, vol. 7, n° 26, 2022.

- [8] Consejo de Derechos Humanos de la ONU, «The promotion, protection and enjoyment of human rights on the Internet. Resolución A/HRC/32/L.20.,» 2016.
- [9] ITU News, «The need for increased digital accessibility during COVID-19 — and beyond,» *ITU News Magazine*, nº 3, 2020.
- [10] ITU-R, «Recommendation ITU-R M.2012-6: Detailed specifications of the radio interfaces of IMT-Advanced,» 2023.
- [11] ITU-R, «Recommendation ITU-R M.2150-0: Detailed specifications of the radio interfaces of IMT-2020,» 2023.
- [12] GSMA, «5G Implementation Guidelines: NSA Option 3,» 2020.
- [13] ITU_R, «Recommendation ITU-R P.530-18: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems,» 2021.
- [14] Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, «Informe de Cobertura 2023: España cierra la brecha digital fija y la cobertura móvil 5G cubre al 92% de la población,» 2024. [En línea]. Available: <https://espanadigital.gob.es/actualidad/informe-de-cobertura-2023-espana-cierra-la-brecha-digital-fija-y-la-cobertura-movil-5g>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [15] Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, «La cobertura 5G móvil alcanza en España al 96% de la población y se triplica en zonas rurales,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transformacion-digital-y-funcion-publica/paginas/2025/040625-cobertura-5g.aspx>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [16] Gobierno de España, «Conoce la convocatoria UNICO 5G Redes Activas 2024 para el despliegue de esta tecnología en zonas rurales,» 2024. [En línea]. Available: <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/conoce-convocatoria-UNICO-5G-Redes-Activas-2024-despliegue-tecnologia-zonas-rurales-prtr>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [17] J. Del Brio, «¿Qué es el Nivel de Potencia en dBm? Guía Completa 2025 para Medir la Intensidad de Señal Móvil y WiFi,» AmplificadorMovil.es, 2025. [En línea]. Available: <https://www.amplificadormovil.es/articles/que-es-dbm-119/>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [18] ITU-R, «Recommendation ITU-R P.525-5: Calculation of free-space attenuation,» 2024.

- [19] World Health Organization (WHO), «WHO Global Air Quality Guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,» 2021.

- [20] European Environment Agency (EEA), «EEA Glossary,» [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [21] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Glosario de calidad del aire,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/glosario-de-terminos.html>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [22] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Resolución de 2 de septiembre de 2020, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se modifica el Anexo de la Orden TEC/351/2019, de 18 de marzo, por la que se aprueba el Índice Nacional de Calidad del Aire,» 2020.

- [23] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), «Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI),» 2024.

- [24] Comisión Europea, «Directiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, (versión refundida).,» 2024.

- [25] A. R. D. D. G. A. T. D. Clements, *The Enhanced Air Sensor Guidebook*, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2022.
- [26] AENOR, «UNE-EN 12341:2024. Calidad del aire. Método de referencia para la medición de PM10 y PM2.5,» 2024.
- [27] Thermo Fisher, «Instruments for Analyzing and Identifying Particulates in Ambient Air,» [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/es/es/home/industrial/environmental/air-quality-analysis/ambient-gas-monitoring/particulates-solutions.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [28] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático México, «Manual 3. Redes Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire,» [En línea]. Available: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [29] N. e. a. Castell, «Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?,» *Environment International*, vol. 99, 2017.
- [30] B. Kelly, «Outdoor CO2 pollution,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.the-ies.org/analysis/outdoor-co2-pollution>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [31] Google Docs Editors Help, «How to use Google Forms,» [En línea]. Available: <https://support.google.com/docs/answer/6281888?sjid=3419648373042181005-EU>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [32] Google Workspace, «Apps Script Reference overview,» [En línea]. Available: <https://developers.google.com/apps-script/reference>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [33] Google Workspace, «Google Apps Script overview,» [En línea]. Available: <https://developers.google.com/apps-script/overview>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [34] pandas, «pandas User Guide,» [En línea]. Available: https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html. [Último acceso: septiembre 2025].
- [35] GeoPandas, «Geopandas Documentation,» [En línea]. Available: <https://geopandas.org/en/stable/docs.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [36] Requests, «Resquest python library Quickstart,» [En línea]. Available: <https://requests.readthedocs.io/en/latest/user/quickstart/>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [37] Psycopg, «Psycopg 2.9.10 documentation,» [En línea]. Available: <https://www.psycopg.org/docs/usage.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [38] The PostgreSQL Global Development Group, «Documentation,» [En línea]. Available: <https://www.postgresql.org/docs/>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [39] PostGIS, «Documentation,» [En línea]. Available: <https://postgis.net/documentation/>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [40] Supabase Inc, «Supabase Documentation,» [En línea]. Available: <https://supabase.com/docs>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [41] Apache Friends, «XAMPP Apache + MariaDB + PHP + Perl,» [En línea]. Available: <https://www.apachefriends.org/index.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [42] Chart.js, «Getting Started,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.chartjs.org/docs/latest/getting-started/>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [43] V. Agafonkin, «Leaflet,» [En línea]. Available: <https://leafletjs.com/reference.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [44] Luxon, «Luxon Github repository,» [En línea]. Available: <https://github.com/moment/luxon>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [45] Google Workspace, «Google Sheets. Hojas de cálculo online y colaborativas,» [En línea]. Available: <https://workspace.google.com/intl/es/products/sheets/>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [46] Mozilla Corporation, «MVC,» [En línea]. Available: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/MVC>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [47] C. Valero, «Bandas de frecuencia en España: cuáles son y cómo se reparten,» Adslzone, junio 2025. [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/#1394160-bandas-de-frecuencia-y-5g>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [48] tinySA, «Home Page tinySA wiki,» [En línea]. Available: <https://tinysa.org/wiki/>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [49] ETSI 3GPP, «LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 18.1.0 Release 18),» 2025. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136214/18.01.00_60/ts_136214v180100p.pdf. [Último acceso: septiembre 2025].
- [50] parizene, «Netmonitor: 5G, Cell & WiFi - Aplicación para Android,» [En línea]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parizene.netmonitor&hl=en>. [Último acceso: septiembre 2025].

- [51] Ministerio de la Presidencia (España), «Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire,» Boletín Oficial del Estado, [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-1645>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [52] S. Torrero Casado, «Código fuente de la aplicación RurAirConnect - Repositorio en Github,» 2025. [En línea]. Available: <https://github.com/SandraTor/RurAirConnect>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [53] V. Agafonkin, «Leaflet Plugins database,» [En línea]. Available: <https://leafletjs.com/plugins.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [54] Leaflet, «Repositorio Github con código y documentación Leaflet.markercluster,» [En línea]. Available: <https://github.com/Leaflet/Leaflet.markercluster>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [55] Leaflet, «Overlapping Marker Spiderfier for Leaflet - Repositorio github,» [En línea]. Available: <https://github.com/jawj/OverlappingMarkerSpiderfier-Leaflet>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [56] PostgreSQL Global Development Group, «PostgreSQL Documentation: Indexes,» [En línea]. Available: <https://www.postgresql.org/docs/current/indexes.html>. [Último acceso: septiembre 2025].
- [57] PostGIS Project, «PostGIS Documentation: Indexing Geometry Columns,» [En línea]. Available: https://postgis.net/docs/using_postgis_dbmanagement.html#spatial_indexes. [Último acceso: septiembre 2025].