

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Sistema de monitorización y verificación de la calidad del aire en entornos urbanos.

**AUTOR/A:** Dennis Tanda Gragasín

**TITULACIÓN:** Ingeniería Telemática

**TUTOR/A:** José Fernán Martínez Ortega

**DEPARTAMENTO:** Departamento de Ingeniería y Electrónica

VºBº TUTOR/A

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE/A:** José David Osés del Campo

**TUTOR/A:** José Fernán Martínez Ortega

**SECRETARIO/A:** Vicente Hernández Díaz

**Fecha de lectura:**

**Calificación:**

El Secretario/La Secretaria,





---

---

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han participado y contribuido de alguna manera en la realización de este trabajo de fin de carrera. Su apoyo y colaboración han sido la clave para la consecución de este proyecto.

En primer lugar, agradezco profundamente a mis padres, *Nanay* y *Tatay*. Su amor y sacrificio constante han sido mi principal fuente de inspiración y motivación a lo largo de estos años. Sin su incondicional respaldo, este logro no habría sido posible.

A Laura, quiero dedicarle un especial reconocimiento. Su paciencia, ánimo y apoyo emocional han sido imprescindibles durante la carrera y el desarrollo de este trabajo. Su confianza en mí ha sido un pilar fundamental que me ha permitido seguir adelante en los momentos más desafiantes.

Finalmente, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todos mis profesores, cuyo conocimiento y colaboración han enriquecido significativamente mi formación y han convertido este viaje académico en una experiencia verdaderamente invaluable. Quiero destacar a mi profesor José Fernando Martínez Ortega, quien generosamente se ofreció a tutorizar este trabajo cuando parecía que no encontraría a nadie, justo dos días antes del cierre del periodo de asignación de proyectos.

A todos, muchas gracias.

---

---

## Resumen

El Sistema de monitorización y verificación de la calidad del aire en entorno urbanos, tiene como objetivo principal mejorar la monitorización y verificación de la calidad del aire en la ciudad de Madrid, complementando los datos de las estaciones fijas existentes con mediciones móviles y descentralizando el procesamiento de datos mediante edge computing. La finalidad es proporcionar una herramienta robusta y precisa para la toma de decisiones informadas sobre la calidad del aire, beneficiando tanto a las autoridades municipales como a los ciudadanos.

Se diseña un sistema de vigilancia para recoger datos en tiempo real utilizando sensores móviles integrados en las rutas de autobuses urbanos mientras que un sistema de predicción utiliza redes neuronales entrenadas con datos históricos y meteorológicos. Este enfoque permite predecir el Índice de Calidad del Aire con precisión y, además de verificar la calidad del aire actual. Adicionalmente, se ha desarrollado una aplicación móvil que ofrece información relevante sobre la calidad del aire, permite la participación activa de los usuarios mediante la adición de nuevas mediciones, y atiende sus peticiones en tiempo real.

Los resultados obtenidos durante las pruebas y simulaciones han sido prometedores, demostrando que el sistema puede operar eficientemente en un entorno real. Aunque la simulación se realizó de forma local y no se pudo probar la conectividad 4G/LTE ni el proceso de establecimiento de contexto de la aplicación MEC, el sistema ha mostrado ser capaz de generar predicciones alineadas con los datos oficiales, validando así su efectividad y utilidad.

El escenario de desarrollo de este proyecto abarca un sistema integral que combina monitorización móvil, predicción precisa y una plataforma de información accesible para los usuarios. Esto establece una base sólida para futuras mejoras y ampliaciones en la gestión de la calidad del aire, contribuyendo a un entorno más saludable y sostenible.

### **PALABRAS CLAVE**

Calidad del aire, Edge Computing, Edge Caching, Multi Access Edge Computing, redes neuronales, datos en tiempo real, gestión ambiental, índice de calidad del aire (ICA), sostenibilidad urbana.

---

---

## **Abstract**

The Air Quality Monitoring and Verification System in Urban Environments aims to enhance the monitoring and verification of air quality in the city of Madrid by supplementing existing fixed station data with mobile measurements and decentralizing data processing through edge computing. The goal is to provide a robust and accurate tool for making informed decisions about air quality, benefiting both municipal authorities and citizens.

A monitoring system is designed to collect real-time data using mobile sensors integrated into urban bus routes, while a prediction system utilizes neural networks trained on historical and meteorological data. This approach allows for accurate predictions of the Air Quality Index (AQI) and verifies current air quality. Additionally, a mobile application has been developed to offer relevant air quality information, enable active user participation by adding new measurements, and respond to user requests in real-time.

The results obtained during tests and simulations have been promising, demonstrating that the system can operate efficiently in a real environment. Although the simulation was conducted locally and connectivity via 4G/LTE and the context establishment process of the MEC application could not be tested, the system has shown to generate predictions aligned with official data, thus validating its effectiveness and utility.

The development scenario of this project encompasses an integrated system that combines mobile monitoring, accurate prediction, and an accessible information platform for users. This establishes a solid foundation for future improvements and expansions in air quality management, contributing to a healthier and more sustainable environment.

### **KEYWORDS**

Air quality, Edge Computing, Edge Caching, Multi Access Edge Computing, neural networks, real-time data, environmental management, air quality index (AQI), urban sustainability.

---

---

## Índice de figuras

Figura 1. Arquitectura MEC [16] .....	8
Figura 2. Diagrama de secuencia de activación del sistema.....	14
Figura 3. Diagrama de secuencia para el proceso de añadir medida .....	14
Figura 4. Diagrama de secuencia para el procedimiento de consultar información .....	15
Figura 5. Diagrama de casos de uso.....	17
Figura 6. Arquitectura del Sistema.....	19
Figura 7. Comparación entre mediciones fijas y mediciones móviles [21] .....	20
Figura 8. Estructura JSON de entrada para registrar medidas en la API.....	21
Figura 9. Intercambio de mensajes para el descubrimiento de la aplicación MEC [17] .....	22
Figura 10. Intercambio de mensajes para la creación del contexto de aplicación MEC [17] ...	23
Figura 11. Diagrama de flujo para la conexión con los nodos de comunicación de una estación móvil .....	24
Figura 12. Fichero XML del portal de calidad del aire de Madrid, con los datos de las medidas en tiempo real.....	26
Figura 13. Fichero JSON con los datos reales de la última hora del fichero XML.....	27
Figura 14. Mapa con las estaciones fijas actuales y las rutas de buses seleccionadas .....	28
Figura 15. Diagrama de clases UML del sistema de predicción .....	30
Figura 16. Fichero Excel de ejemplo de registro de las medidas de los sensores .....	31
Figura 17. Pantalla de inicio de la aplicación móvil .....	32
Figura 18. Notificación de la aplicación, alertando del ICA perjudicial de la zona .....	33
Figura 19. Pantalla Información Medidas .....	33
Figura 20. Pantalla Mostrar Mapa.....	34
Figura 21. Pantalla Añadir Medidas .....	35
Figura 22. Comando y logs de la puesta en marcha de la aplicación MEC.....	36
Figura 23. Mensaje de verificación del correcto funcionamiento de la aplicación MEC.....	36
Figura 24. Logs indicando la correcta obtención y generación del fichero JSON con las medidas en tiempo real.....	36
Figura 25. Logs de envío de medidas simuladas .....	37
Figura 26. Logs de método POST /registrarmedidasaire de la aplicación MEC .....	37
Figura 27. Logs de la aplicación MEC correspondiente con las pruebas de la aplicación móvil .....	37

---

---

## Índice de Tablas

Tabla 1. Endpoint definidos del Sistema de Predicción .....	31
Tabla 2. Codificación por colores según ICA .....	34
Tabla 3. Resultados de las pruebas del sistema de información .....	39
Tabla 4. Presupuestos, mediciones, unidades y precios .....	48
Tabla 5. Presupuestos parciales de Hardware.....	48
Tabla 6. Presupuestos parciales de Desarrollo Software.....	48
Tabla 7. Presupuestos Parciales de Puesta en Marcha y Mantenimiento.....	48
Tabla 8. Tabla de presupuestos general.....	49

---

---

## Lista de acrónimos

AEMET - Agencia Estatal de Meteorología

BOE - Boletín Oficial del Estado

C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> - Benceno

CO - Monóxido de carbono

Dióxido de nitrógeno - NO<sub>2</sub>

E-Caching - Edge Caching

E-Computing - Edge Computing

EMT - Empresa Municipal de Transportes

IDE - Integrated Development Environment

LSTM - Long short-term memory

LTSME - LSTM Extended

MAP - Error Porcentual absoluto medio

MEC - Multi-Access edge computing

MEO - MEC Orchestrator

NO<sub>x</sub> - Óxidos de nitrógeno

O<sub>3</sub> - Ozono

Pb - Plomo

PM<sub>10</sub> - Partículas en suspensión

PM<sub>2.5</sub> - Partículas en suspensión

RNN - Red Neuronal Recurrente

SO<sub>2</sub> - Dióxido de azufre

UE - User Equipment



---

# Índice de contenidos

<b>Resumen .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tablas.....</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de acrónimos.....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Marco y motivación del proyecto.....	1
1.2 Objetivos técnicos y académicos .....	2
1.3 Estructura del resto de la memoria .....	3
<b>2. Marco Tecnológico .....</b>	<b>4</b>
2.1 Sensores de calidad del aire .....	4
2.1.1 Sistema de Vigilancia actual.....	4
2.1.2 Sensores de calidad de aire actuales.....	4
2.2 Procesamiento descentralizado .....	5
2.2.1 Edge Computing.....	5
2.2.2 Edge Caching .....	6
2.2.3 Multi-Access Edge Computing.....	6
2.3 Red Neuronal Long Short-Term Memory .....	9
2.4 Android Studio .....	9
<b>3. Especificaciones y restricciones de diseño .....</b>	<b>11</b>
3.1 Especificaciones .....	11
3.2 Restricciones de diseño .....	12
3.3 Análisis de requisitos .....	13
<b>4. Descripción de la solución propuesta .....</b>	<b>18</b>
4.1 Arquitectura del Sistema .....	18
4.2 Diseño Detallado.....	19
4.2.1 Sistema de Vigilancia.....	19
4.2.2 Sistema de Predicción .....	21
4.2.3 Sistema de Información .....	25
4.3 Implementación del Sistema .....	26
4.3.1 Implementación del Sistema de Vigilancia .....	26
4.3.2 Implementación del Sistema de Predicción .....	28
4.3.3 Implementación del Sistema de Información .....	32
<b>5. Resultados .....</b>	<b>36</b>
5.1 Sistema de Vigilancia .....	38
5.2 Sistema de Predicción.....	38
5.3 Sistema de Información .....	39

---

<b>6.</b>	<b>Impacto del proyecto .....</b>	<b>40</b>
6.1	Identificación de Impactos y Problemáticas .....	40
<b>7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>42</b>
7.1	Conclusiones.....	42
7.2	Resultados .....	43
7.3	Conocimientos derivados.....	44
7.1	Trabajos futuros .....	44
<b>8.</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>46</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>.....</b>	<b>48</b>
A.1	Presupuestos .....	48
A.1.1.	Mediciones, Unidades y Precios .....	48
A.1.2.	Presupuestos Parciales.....	48
A.1.3.	Presupuesto General .....	49
A.2	Manuales de Usuario .....	50
A.2.1.	Simulador del Sistema de Vigilancia.....	50
A.2.2.	Aplicación MEC.....	50
A.2.3.	Aplicación Móvil icaMad .....	51

# 1. Introducción

## 1.1 Marco y motivación del proyecto

Actualmente, el sistema de Vigilancia en Madrid consta de 24 estaciones fijas distribuidas estratégicamente por toda la ciudad [1]. Estas estaciones realizan mediciones constantes de diversos parámetros de calidad del aire (Sistema de Vigilancia), cuyos datos se recopilan en un servidor central (sistema de Predicción). Este servidor analiza los datos y proporciona información sobre el estado de la calidad del aire. Por último, el sistema de Información se encarga de divulgar estos datos al público a través de una página web [2] y una aplicación móvil [3], permitiendo a los ciudadanos acceder a información en tiempo real.

Este sistema cuenta con ciertas limitaciones que restringen su potencial. La dependencia exclusiva de estaciones fijas limita la cobertura geográfica y la resolución espacial de las mediciones. Además, el procesamiento centralizado de los datos puede generar cuellos de botella en la red, afectando la velocidad y eficiencia de la respuesta. La aplicación móvil actual, aunque funcional, presenta margen de mejora en cuanto a la interactividad y la personalización de la información proporcionada al usuario.

Este proyecto propone una serie de mejoras que abordan directamente las limitaciones mencionadas. En primer lugar, se propone la inclusión de sensores de calidad del aire en los autobuses urbanos de la EMT (Empresa Municipal de Transportes). Esta estrategia permitirá obtener un mayor número de muestras en una zona geográfica más amplia y diversa, aumentando significativamente la resolución espacial y temporal de las mediciones.

En segundo lugar, se sugiere la descentralización del sistema de Predicción mediante la implementación de edge computing [4] y edge caching [5]. Esta técnica permitirá el procesamiento de datos en el borde de la red, reduciendo la carga en el servidor central y mejorando la eficiencia del tráfico de red. La utilización de aplicaciones MEC (Multi-access Edge Computing) [6] en nodos con conectividad 4G y 5G permitirá una respuesta más rápida y eficiente a los usuarios.

Finalmente, el sistema de Información se actualizará para permitir a los usuarios consultar en tiempo real la calidad del aire en su ubicación específica y en toda la ciudad, utilizando un mapa codificado por colores. Además, se habilitará la posibilidad de que los usuarios añadan sus propias mediciones, las cuales serán validadas y utilizadas para mejorar la precisión del índice de calidad del aire.

La Agenda 2030 incluye entre sus objetivos [7] garantizar una vida sana, promover ciudades y comunidades sostenibles y tomar acciones contra el cambio climático y sus efectos. Para cumplir con estos objetivos, Madrid ha implementado 170 medidas [8], entre ellas la Medida 36, que busca 'reducir el número de muertes y enfermedades provocadas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo', y la Medida 140, enfocada en la 'ampliación de la Red de Calidad del Aire'. Este proyecto se motiva principalmente por la

necesidad de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos de Madrid mediante un sistema de monitorización del aire más eficaz y accesible, contribuyendo así a alcanzar los objetivos de las medidas implementadas por la comunidad de Madrid.

## **1.2 Objetivos técnicos y académicos**

Los objetivos de este proyecto fin de carrera son, desde el punto de vista técnico:

- Ampliación de la Red de Monitoreo:
  - Integrar sensores de calidad del aire en autobuses urbanos para aumentar la cobertura geográfica y la resolución espacial de las mediciones.
- Mejora en la precisión de los datos:
  - Implementar algoritmos de predicción y de validación de datos para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones obtenidas tanto de estaciones fijas como de los sensores móviles.
  - Desarrollar modelos predictivos basados en machine learning para anticipar niveles de contaminación y alertar a los ciudadanos y autoridades competentes con suficiente antelación.
- Descentralización del procesamiento:
  - Desarrollar una infraestructura de E-Computing para procesar los datos en el borde de la red, reduciendo la latencia y mejorando la eficiencia del sistema.
  - Utilizar técnicas de E-Caching para minimizar el tráfico de datos hacia el servidor central y mejorar la velocidad de respuesta del sistema.
  - Implementar aplicaciones para proporcionar procesamiento local y mejorar la respuesta en tiempo real.
- Actualización del Sistema de Información:
  - Rediseñar la aplicación móvil para ofrecer una interfaz más intuitiva y funcional, que permita consultar la calidad del aire en tiempo real.
- Escalabilidad del sistema:
  - Diseñar el sistema de manera modular y escalable para permitir la incorporación de nuevos sensores y tecnologías en el futuro sin necesidad de reestructurar la infraestructura existente.

Desde el punto de vista académico, el proyectista adquiere las siguientes competencias y habilidades:

- Adquirir y aplicar conocimientos avanzados en tecnologías de comunicaciones móviles (4G y 5G).
- Comprender y aplicar conceptos de E-Computing y E-Caching.
- Desarrollar la capacidad de diseñar y desplegar aplicaciones MEC.
- Mejorar competencias en el desarrollo de aplicaciones móviles.
- Desarrollar habilidades en el diseño de interfaces de usuario intuitivas y funcionales.
- Adquirir competencias en el análisis de grandes volúmenes de datos y el uso de algoritmos de machine learning para modelado predictivo.

- Desarrollar habilidades en la planificación y gestión de proyectos tecnológicos complejos.
- Mejorar habilidades en la redacción de documentación técnica y académica.
- Desarrollar competencias en la presentación de resultados y avances del proyecto de manera clara y efectiva.

### **1.3 Estructura del resto de la memoria**

En los próximos capítulos de la memoria se ofrece información sobre el desarrollo del proyecto. Se ha dividido en tres sistemas principales: el Sistema de Vigilancia, el Sistema de Predicción y el Sistema de Información. Cada capítulo del documento aborda en detalle el diseño, implementación, pruebas y resultados de estos tres sistemas, proporcionando una visión integral del proyecto y sus contribuciones a la gestión de la calidad del aire en entornos urbanos.

Para finalizar, el documento concluye con una evaluación de los resultados obtenidos y una discusión sobre las implicaciones y posibles mejoras futuras del sistema. Se destaca cómo la integración de estos tres sistemas proporciona una herramienta robusta y precisa para la toma de decisiones informadas sobre la calidad del aire, beneficiando tanto a las autoridades municipales como a los ciudadanos. Además, se mencionan las ventajas del enfoque de E-Computing, que permite descentralizar el procesamiento de datos, mejorando la eficiencia y reduciendo la latencia en la entrega de información.

## 2. Marco Tecnológico

En este capítulo se detallan las tecnologías y herramientas fundamentales empleadas en el desarrollo de este sistema. Se aborda la infraestructura de comunicaciones, incluyendo las redes 4G y 5G, así como las tecnologías de E-Computing y E-Caching. Además, se examinan los sensores de calidad del aire utilizados, los algoritmos de análisis de datos y machine learning implementados, y las plataformas de desarrollo de aplicaciones móviles. Este marco tecnológico proporciona la base necesaria para entender las capacidades y los desafíos técnicos del proyecto, destacando cómo cada componente contribuye a la eficacia y eficiencia del sistema propuesto.

### 2.1 Sensores de calidad del aire

#### 2.1.1 Sistema de Vigilancia actual

Para la monitorización del índice de la calidad del aire (ICA), la Comunidad de Madrid cuenta con la Red de Control y Vigilancia. La finalidad principal de esta red es registrar los niveles de concentración de los principales contaminantes atmosféricos, con el objetivo de definir las actuaciones o políticas necesarias para alcanzar los niveles de calidad del aire recomendables para la salud de las personas y la conservación del medio ambiente.

La Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid está compuesta por un conjunto de estaciones automáticas fijas distribuidas por todo el territorio, así como un laboratorio móvil, que detectan y registran los siguientes contaminantes:

- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- Dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>).
- Partículas en suspensión (PM<sub>10</sub>).
- Partículas en suspensión (PM<sub>2.5</sub>).
- Plomo (Pb).
- Monóxido de carbono (CO).
- Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>).
- Ozono (O<sub>3</sub>).
- Arsénico, Cadmio, Níquel y Benzo(a)pireno.

#### 2.1.2 Sensores de calidad de aire actuales

En el mercado actual, existe una gran variedad de sensores para cada uno de estos contaminantes, ofreciendo diferentes niveles de precisión, costo y complejidad técnica. A continuación, se detallan proyectos actuales en los que innovan en la medición y monitorización de los contaminantes en el aire que respiramos.

Aeroqual [9] ofrece una amplia gama de sensores portátiles para la medición de la calidad del aire tanto en exteriores como en interiores. Además, cuenta con varias series de estaciones compactas que proporcionan información sobre la cantidad de polvo, partículas en

suspensión y hasta tres contaminantes adicionales, así como otras series de medidores que pueden medir hasta 20 contaminantes diferentes en tiempo real.

PurpleAir [10], por su parte, diseña y desarrolla sensores basados en una nueva generación de detectores láser de partículas de bajo costo. Estos sensores utilizan WiFi para comunicarse y cargar datos en la nube, los cuales se comparten en el mapa de PurpleAir. Además, utilizan el chip ESP8266 para funciones de comunicación y actualización remota del firmware, asegurando la consistencia y precisión de las mediciones.

IQAir [11] ofrece el AirVisual Pro-Monitor, que informa de la calidad del aire en interiores de hogares, escuelas y empresas. Este dispositivo mide la contaminación del aire proveniente de diversas fuentes como la cocina, limpieza, combustión de leña, decoración de interiores, tabaquismo, humo de incendios forestales y contaminación del tráfico. Los datos se pueden ver en tiempo real y consultar el historial a través de la aplicación móvil gratuita IQAir AirVisual, facilitando la comprensión de la calidad del aire.

Además de estas opciones, los sensores varían en cuanto a su tecnología de detección, rango de medición, tiempo de respuesta y requisitos de mantenimiento. Por ejemplo, los sensores electroquímicos [12] son comunes para la detección de gases como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el monóxido de carbono (CO) debido a su alta sensibilidad y bajo costo. Los sensores ópticos [13], como los basados en espectroscopía de absorción, se utilizan para medir dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y partículas en suspensión (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) por su precisión y capacidad para proporcionar datos en tiempo real.

Todas estas variaciones se considerarán para cumplir con las restricciones y limitaciones del diseño del sistema de vigilancia de este proyecto. La selección adecuada de sensores es crucial para asegurar que el sistema de vigilancia no solo cumpla con los estándares de calidad actuales, sino que también sea adaptable y sostenible a largo plazo.

## **2.2 Procesamiento descentralizado**

### **2.2.1 Edge Computing**

El E-Computing es una arquitectura de red descentralizada que lleva el procesamiento de datos y el almacenamiento más cerca de los puntos donde se generan los datos, es decir, en el 'borde' de la red. Esta tecnología se está convirtiendo en una parte crucial de los sistemas modernos de monitorización y control debido a sus múltiples beneficios en términos de latencia, eficiencia de red y escalabilidad [14].

Además, permite procesar los datos localmente, lo que reduce significativamente el tiempo de respuesta. Esto es especialmente importante en aplicaciones que requieren decisiones en tiempo real. Al procesar y filtrar los datos en el borde de la red, se disminuye la cantidad de datos que necesitan ser enviados a los servidores centrales, lo que reduce el tráfico de red y mejora la eficiencia general del sistema.

La arquitectura descentralizada facilita la escalabilidad del sistema. Nuevos nodos de procesamiento pueden ser añadidos según sea necesario sin necesidad de realizar grandes cambios en la infraestructura central.

Aunque el E-Computing ofrece muchas ventajas, también presenta algunos desafíos que deben ser considerados. La gestión de múltiples nodos descentralizados puede ser compleja y requiere soluciones avanzadas para monitorear y mantener la infraestructura distribuida. Al igual que mantener y actualizar el software en una arquitectura distribuida, ya que cada nodo debe ser individualmente gestionado y actualizado.

### **2.2.2 Edge Caching**

El E-Caching [15] es una técnica utilizada para mejorar el rendimiento de la red y reducir la latencia mediante el almacenamiento temporal de contenido y datos frecuentemente accedidos en los nodos de borde. En lugar de enviar cada solicitud de datos a un servidor central, permite que los datos se almacenen localmente, cerca de los usuarios finales. Esto es especialmente relevante en aplicaciones que requieren acceso rápido y eficiente a grandes volúmenes de datos.

En el contexto del sistema de monitorización de la calidad del aire en Madrid, esta tecnología puede desempeñar un papel muy importante. Al almacenar los datos históricos y las mediciones recientes de calidad del aire en los nodos de procesamiento, se puede proporcionar acceso rápido a esta información sin necesidad de recurrir constantemente a un servidor central. Al igual que el E-Computing, esto no solo reduce la latencia, sino que también disminuye el tráfico de red, mejorando la eficiencia global del sistema.

Además, el E-Caching puede facilitar la implementación de algoritmos de predicción y análisis en tiempo real directamente en los nodos del borde. Este enfoque descentralizado y proactivo puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta del sistema de monitorización y proporcionar información más precisa y oportuna a los ciudadanos y autoridades de Madrid.

### **2.2.3 Multi-Access Edge Computing**

Las aplicaciones de Multi-access Edge Computing [16] son una extensión del concepto de E-Computing, diseñadas para proporcionar servicios de computación y almacenamiento más cerca de los usuarios finales. MEC permite a las aplicaciones procesar datos y ejecutar servicios directamente en las redes de acceso, lo que mejora significativamente la eficiencia del sistema. Los usuarios pueden acceder a servicios y aplicaciones más rápidos y fiables, ya que los datos y los servicios están ubicados más cerca de ellos. Esto es vital para aplicaciones móviles y servicios en tiempo real que dependen de una baja latencia.

## **Componentes MEC**

### Host MEC

Es una entidad que contiene una plataforma MEC y una infraestructura de virtualización que proporciona recursos de procesamiento, almacenamiento y red para ejecutar aplicaciones MEC. Se encarga de la gestión de la plataforma y el gestor de infraestructura de virtualización.

### Plataforma MEC

Se trata del conjunto de funcionalidades esenciales requeridas para ejecutar aplicaciones MEC en una infraestructura de virtualización específica y permitirles proporcionar y consumir servicios MEC. Además, este componente puede ofrecer servicios propios. Es responsable de las siguientes funciones:

- Ofrecer un entorno donde las aplicaciones puedan descubrir, anunciar, consumir y ofrecer servicios.
- Recibir reglas de tráfico del gestor de la plataforma, aplicaciones o servicios e instruir al plano de datos en consecuencia.
- Recibir registros DNS del gestor de la plataforma y configurar un proxy/servidor DNS en consecuencia.
- Alojar servicios, posiblemente incluyendo servicios descritos en la normativa aplicable.
- Proporcionar acceso a almacenamiento persistente.

### Aplicaciones MEC

Son aquellas aplicaciones que se instancian en la infraestructura de virtualización del host MEC basándose en configuraciones o solicitudes validadas. Estas aplicaciones se ejecutan como aplicaciones virtualizadas, ya sea en máquinas virtuales o en contenedores, sobre la infraestructura de virtualización proporcionada por el host MEC. Estas aplicaciones pueden interactuar con la plataforma para consumir y proporcionar servicios, así como para realizar procedimientos de soporte relacionados con su ciclo de vida, como indicar disponibilidad o preparar la reubicación del estado del usuario [17].

Entre el UE (User Equipment – Equipo de Usuario) y el nodo, (eNodoB en caso de 4G/LTE y gNodoB en caso de 5G) intercambian varios tipos de mensajes para utilizar una aplicación MEC. Inicialmente, el UE consulta las aplicaciones disponibles a través de un proceso de búsqueda de aplicaciones, lo cual permite obtener una lista de aplicaciones MEC disponibles en el sistema. Luego, el UE puede crear un contexto de aplicación mediante una solicitud POST al recurso del sistema, proporcionando datos específicos como identificadores y descripciones de la aplicación.

Una vez que el contexto de la aplicación está creado, puede actualizarse mediante una solicitud PUT que contiene la estructura modificada del contexto de la aplicación. Además, el sistema MEC envía eventos de notificación al UE a través de mensajes POST a una referencia de callback proporcionada por la aplicación de la unidad móvil. Estos eventos pueden incluir modificaciones en la dirección de la aplicación o cambios relevantes en el sistema.

Finalmente, el UE puede eliminar el contexto de la aplicación mediante una solicitud DELETE, asegurando que los recursos se liberen adecuadamente en el sistema MEC. Este intercambio de mensajes garantiza que la aplicación funcione de manera eficiente y que el UE reciba la información y las actualizaciones necesarias en tiempo real.

### Orquestador MEC

El orquestador MEC (MEO) es el componente central responsable de mantener una visión general del sistema MEC completo. Es responsable de:

- Mantener una visión global del sistema MEC basado en los hosts desplegados, recursos disponibles, servicios disponibles y topología.
- Incorporar paquetes de aplicaciones, incluyendo la verificación de la integridad y autenticidad de los paquetes, y la validación de reglas y requisitos de aplicaciones.
- Seleccionar los hosts adecuados para la instanciación de aplicaciones según restricciones como latencia, recursos y servicios disponibles.
- Desencadenar la instanciación y finalización de aplicaciones, así como su reubicación cuando sea necesario.

En la figura 1 se muestra una visión general de la arquitectura.

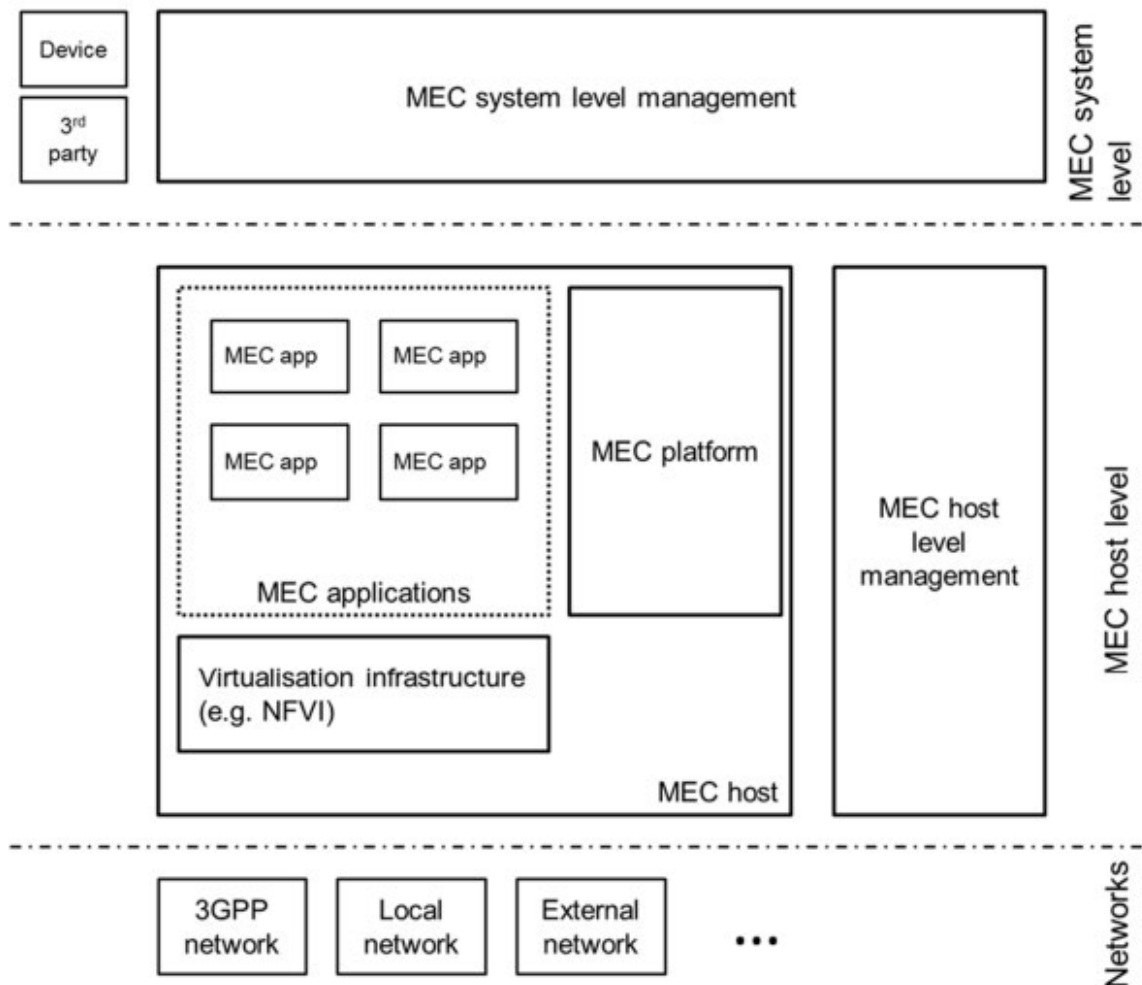


Figura 1. Arquitectura MEC [16]

## **2.3 Red Neuronal Long Short-Term Memory**

Las redes neuronales de memoria a largo plazo (Long Short-Term Memory, LSTM) son un tipo de red neuronal recurrente (RNN) diseñada para superar las limitaciones de las RNN tradicionales [18] en el manejo de dependencias a largo plazo. Las LSTM son capaces de recordar información durante largos periodos de tiempo y son especialmente útiles en tareas que requieren el análisis de secuencias temporales. Este tipo de red utiliza una estructura de células de memoria que pueden retener y olvidar información selectivamente a través de puertas de entrada, salida y olvido, lo que les permite manejar problemas de desvanecimiento de gradiente y capturar dependencias a largo plazo en los datos.

En el contexto de la predicción de la concentración de contaminantes del aire, las redes neuronales LSTM se han demostrado efectivas para capturar las dependencias temporales de las series de tiempo de datos de calidad del aire. El siguiente proyecto [19] propone un modelo de red neuronal LSTM extendido (LSTME) que considera tanto las correlaciones espaciales como las temporales para la predicción de la concentración de contaminantes atmosféricos. El modelo LSTME utiliza capas LSTM para extraer automáticamente características útiles de los datos históricos de contaminantes del aire, y además integra datos auxiliares, como datos meteorológicos y de marcas de tiempo, para mejorar el rendimiento del modelo.

Dicho proyecto, utilizó datos horarios de concentración de PM2.5 recolectados en 12 estaciones de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Beijing desde el 1 de enero de 2014 hasta el 28 de mayo de 2016, demostró que el modelo LSTME supera a otros modelos basados en estadísticas, como el modelo de media móvil autorregresiva, la red neuronal de retardo temporal y la regresión por vectores de soporte. Los experimentos mostraron que el modelo LSTME tiene un error porcentual absoluto medio (MAPE) de 11.93% en tareas de predicción a una hora, y logró un desempeño satisfactorio incluso para tareas de predicción de 13 a 24 horas (MAPE de 31.47%).

El uso de redes LSTM para la predicción de la calidad del aire destaca la relevancia de tener en cuenta las dependencias a largo plazo y las correlaciones espaciales en los datos. Al aumentar la precisión en las predicciones de contaminantes, estas tecnologías pueden ofrecer alertas tempranas más precisas y, contribuir de manera significativa a la protección de la salud pública y a la gestión del medio ambiente.

## **2.4 Android Studio**

Android Studio es el entorno de desarrollo integrado (IDE) oficial para la plataforma Android, desarrollado por Google. Esta herramienta es esencial para el desarrollo de aplicaciones móviles debido a su conjunto de características robustas y especializadas que facilitan la creación, depuración y optimización de aplicaciones para dispositivos Android. Cuenta con un editor de código avanzado con soporte para Java, Kotlin y C++, además de un emulador de Android que permite probar aplicaciones en múltiples configuraciones de dispositivos. Incluye herramientas integradas para la gestión de versiones, la construcción de interfaces de usuario

mediante arrastrar y soltar, y la integración de servicios de Google, como Google Maps, para añadir funcionalidades geográficas y usos de mapas. La combinación de estas capacidades hace de Android Studio una plataforma poderosa y versátil para el desarrollo de aplicaciones móviles, asegurando que los desarrolladores puedan crear aplicaciones eficientes, intuitivas y escalables.

### **3. Especificaciones y restricciones de diseño**

El desarrollo del sistema de monitorización y verificación de la calidad del aire en entornos urbanos, centrado en la ciudad de Madrid, requiere establecer una serie de especificaciones y restricciones de diseño que guiarán la implementación y asegurarán el cumplimiento de los objetivos planteados. Este capítulo detalla las especificaciones iniciales del proyecto, alineadas con los objetivos técnicos, y las restricciones que deben considerarse para solventar los posibles problemas de ingeniería. Para ello se profundiza en cada objetivo inicial, y se detallan sus especificaciones concretas.

#### **3.1 Especificaciones**

##### **Ampliación de la red de monitoreo**

**Objetivo:** Integrar sensores de calidad del aire en autobuses urbanos para aumentar la cobertura geográfica y la resolución espacial de las mediciones.

**Especificaciones:**

- **Selección de Sensores:** Los sensores deben ser compactos, de bajo consumo energético, y capaces de medir diversos contaminantes atmosféricos como NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, y O<sub>3</sub>.
- **Instalación en Autobuses:** Los sensores deben ser instalados de manera segura en autobuses urbanos, con un sistema de comunicación que permita la transmisión continua de datos.
- **Mantenimiento y Calibración:** Los sensores deben ser fáciles de mantener y calibrar periódicamente para asegurar la precisión de las mediciones.

##### **Mejora en la precisión de los datos**

**Objetivo:** Implementar algoritmos de calibración, predicción y validación de datos para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones.

**Especificaciones:**

- **Calibración Automática:** Desarrollar algoritmos que permitan la calibración automática de los sensores, utilizando datos de referencia de estaciones fijas.
- **Modelos Predictivos:** Implementar modelos de machine learning para predecir niveles de contaminación basados en datos históricos y condiciones meteorológicas.
- **Validación de Datos:** Integrar métodos de validación cruzada para asegurar que los datos recogidos por los sensores móviles y fijos sean consistentes y precisos.

##### **Descentralización del procesamiento**

**Objetivo:** Desarrollar una infraestructura de E-Computing para procesar los datos en el borde de la red, reduciendo la latencia y mejorando la eficiencia del sistema.

Especificaciones:

- Infraestructura Edge: Implementar nodos de procesamiento local en estaciones de monitoreo y en autobuses equipados con sensores.
- Edge Caching: Utilizar técnicas de E-Caching para almacenar temporalmente los datos localmente y minimizar el tráfico hacia el servidor central.
- Aplicaciones MEC: Desarrollar aplicaciones para proporcionar procesamiento local y mejorar la respuesta en tiempo real.

#### Actualización del sistema de información

Objetivo: Rediseñar la aplicación móvil para ofrecer una interfaz más intuitiva y funcional, que permita consultar la calidad del aire en tiempo real.

Especificaciones:

- Interfaz de Usuario: Diseñar una interfaz de usuario que sea fácil de navegar y que proporcione información clara y concisa sobre la calidad del aire.
- Funcionalidades Adicionales: Incluir funciones adicionales como alertas personalizadas, mapas interactivos de calidad del aire y la capacidad de reportar observaciones por parte de los usuarios.
- Compatibilidad: Asegurar la compatibilidad de la aplicación con una amplia gama de dispositivos móviles y sistemas operativos.

#### Escalabilidad del sistema

Objetivo: Diseñar el sistema de manera modular y escalable para permitir la incorporación de nuevos sensores y tecnologías en el futuro sin necesidad de reestructurar la infraestructura existente.

Especificaciones:

- Arquitectura Modular: Diseñar el sistema con una arquitectura modular que facilite la adición de nuevos componentes y sensores.
- Interoperabilidad: Asegurar que el sistema sea interoperable con futuras tecnologías y estándares de comunicación.
- Capacidad de Expansión: Implementar una infraestructura que permita la expansión geográfica de la red de sensores sin comprometer el rendimiento del sistema.

### **3.2 Restricciones de diseño**

En este apartado se establecen los parámetros y las condiciones que deben considerarse a la hora del desarrollo de este sistema. Estas restricciones, derivadas de factores financieros, normativos, técnicos y de infraestructura, definirán el proceso de diseño e implementación del proyecto.

- Limitaciones Financieras: El diseño e implementación deben ajustarse a un presupuesto limitado, optimizando los recursos y priorizando las funcionalidades más críticas.
- Compatibilidad: El sistema debe ser compatible con la infraestructura de monitoreo y comunicaciones existente en Madrid, evitando la necesidad de cambios drásticos en la infraestructura actual.
- Cumplimiento Normativo: El proyecto debe cumplir con todas las normativas y regulaciones locales, nacionales e internacionales relacionadas con la calidad del aire y la instalación de dispositivos en vehículos públicos.
- Protección de Datos: Se deben implementar medidas de seguridad para proteger los datos recogidos y transmitidos por los sensores, garantizando la privacidad de los usuarios.
- Mantenimiento Preventivo: El sistema debe ser diseñado para facilitar el mantenimiento preventivo y correctivo de los sensores y nodos de procesamiento.
- Durabilidad de los Equipos: Los equipos instalados deben ser duraderos y capaces de soportar las condiciones ambientales adversas presentes en un entorno urbano.

### **3.3 Análisis de requisitos**

En esta sección, se detallarán diferentes casos de uso de este sistema. Estos casos de uso representan escenarios prácticos en los que el sistema puede ser aplicado para mejorar la gestión de la calidad del aire, proporcionar información relevante a diversos actores y contribuir a la sostenibilidad urbana. Mediante estos casos de uso, se analizan y definen los requisitos del sistema, asegurando que se consideren todas las necesidades y condiciones específicas para su correcto funcionamiento. Cada caso de uso abordará cómo interactúan las diferentes partes interesadas y cómo se recopilan y utilizan los datos. A través de estos ejemplos, se ilustrará la versatilidad y eficacia del sistema propuesto para enfrentar los desafíos actuales de la calidad del aire en las ciudades.

#### **Monitorización Dinámica de la Calidad del Aire en Tiempos de Alta Contaminación**

Durante episodios de alta contaminación, como incendios forestales o eventos industriales, las autoridades municipales pueden utilizar el sistema de monitorización móvil para obtener datos en tiempo real sobre la calidad del aire en diferentes partes de la ciudad.

Las autoridades municipales activan el sistema de monitorización, el cual integra sensores móviles en las rutas de autobuses urbanos. Estos sensores recogen datos en tiempo real sobre contaminantes específicos como O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Los datos recolectados son procesados inmediatamente mediante E-Computing, lo que reduce el tiempo de latencia, como se muestra en la figura 2. Los resultados se actualizan en tiempo real en la aplicación móvil, proporcionando información inmediata a los ciudadanos. Con esta información, las autoridades pueden tomar decisiones informadas, emitir alertas y hacer recomendaciones a la población para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública.

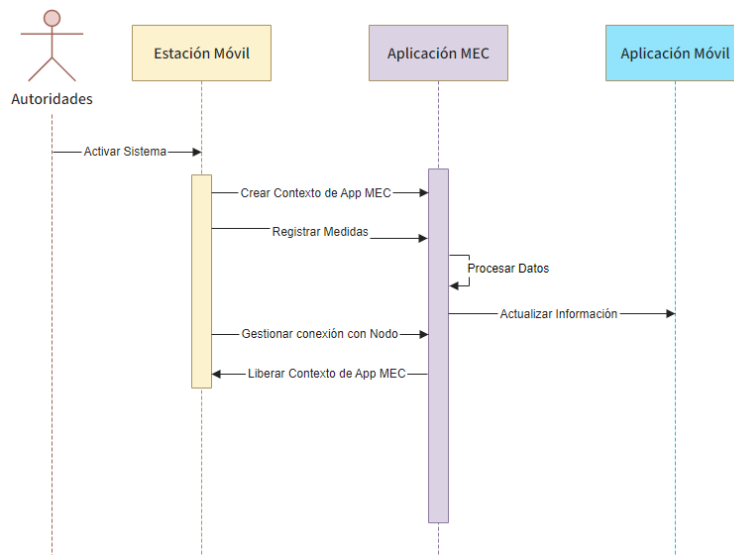


Figura 2. Diagrama de secuencia de activación del sistema

### Participación Ciudadana y Educación Ambiental

Los ciudadanos interesados en la calidad del aire pueden participar activamente en el monitoreo y obtener información educativa a través de la aplicación móvil.

Los ciudadanos descargan la aplicación móvil. Una vez descargada, pueden añadir sus propias mediciones de calidad del aire utilizando dispositivos personales compatibles. Estas mediciones se validan automáticamente y se integran en la base de datos del sistema, explicado mediante un diagrama en la figura 3. La aplicación también puede proporcionar información educativa sobre los diferentes contaminantes y sus efectos en la salud. Además, los usuarios podrían unirse a programas de vigilancia comunitaria y recibir recompensas por sus contribuciones.

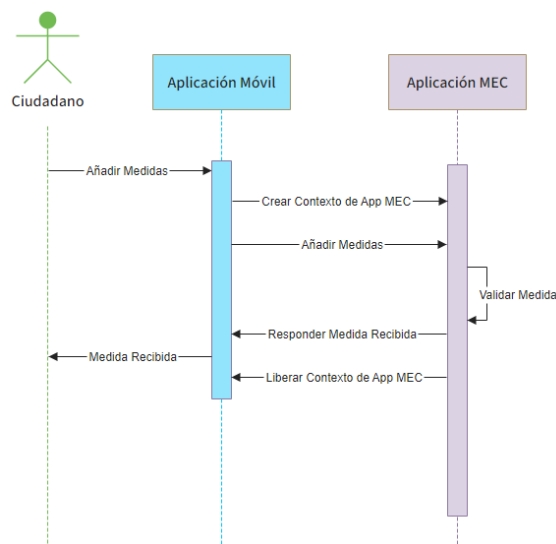


Figura 3. Diagrama de secuencia para el proceso de añadir medida

### Evaluación de Políticas Ambientales

Los responsables de políticas ambientales pueden utilizar el sistema para evaluar la efectividad de las medidas implementadas para mejorar la calidad del aire.

Para establecer una línea base, se recopilan datos de calidad del aire antes de implementar una nueva política. En la figura 4 se muestra cual es el procedimiento para solicitar información a la aplicación móvil. Luego, se realiza un monitoreo continuo de la calidad del aire después de la implementación. Los datos previos y posteriores a la implementación se analizan comparativamente para evaluar los cambios. Se genera un informe detallado sobre la efectividad de la política, destacando tanto las mejoras como las áreas que requieren atención adicional. Finalmente, basándose en los resultados, se hacen recomendaciones para futuras políticas o ajustes a las políticas actuales.

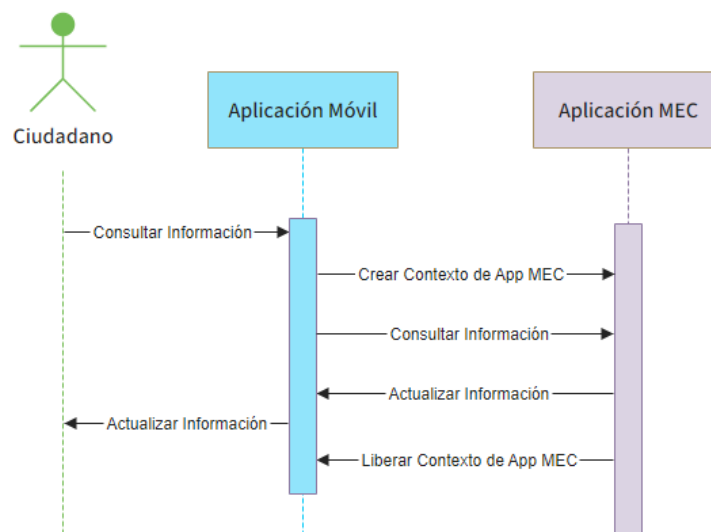


Figura 4. Diagrama de secuencia para el procedimiento de consultar información

Analizando los casos de uso presentados anteriormente, se identifican los siguientes requisitos que deben cumplir los sistemas a desarrollar:

- Requisitos Funcionales
  - Recolección de Datos en Tiempo Real
    - Los sensores móviles deben recoger datos en tiempo real sobre contaminantes específicos como O3, NO2 y PM2.5.
  - Procesamiento de Datos
    - Los datos recolectados deben ser procesados inmediatamente mediante E-Computing, reduciendo el tiempo de latencia.
  - Actualización en la Aplicación Móvil
    - Los resultados deben actualizarse en tiempo real en la aplicación móvil, proporcionando información inmediata a los ciudadanos.
  - Toma de Decisiones Informadas
    - Las autoridades deben poder utilizar los datos para emitir alertas y hacer recomendaciones a la población.
  - Consulta en la Aplicación Móvil
    - Las organizaciones y el público deben poder consultar las predicciones a través de la aplicación móvil.
  - Participación Ciudadana
    - Los ciudadanos deben poder añadir sus propias mediciones, y participar en programas de vigilancia comunitaria.
- Requisitos No Funcionales
  - Confiabilidad
    - El sistema debe garantizar la recolección y procesamiento confiable de datos en tiempo real.
  - Escalabilidad
    - El sistema debe ser escalable para manejar un número creciente de sensores y datos sin pérdida de rendimiento.
  - Usabilidad
    - La aplicación móvil debe ser intuitiva y fácil de usar para todos los ciudadanos.
  - Interoperabilidad
    - El sistema debe ser capaz de integrarse con otros sistemas y plataformas existentes utilizados por las autoridades municipales.
  - Rendimiento
    - El sistema debe ser capaz de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real con baja latencia.
  - Mantenibilidad
    - El sistema debe ser fácil de mantener y actualizar para asegurar su correcto funcionamiento a lo largo del tiempo.

En la figura 5 se presenta un diagrama UML que ilustra los casos de uso, destacando las interacciones entre los actores y las funcionalidades del sistema.

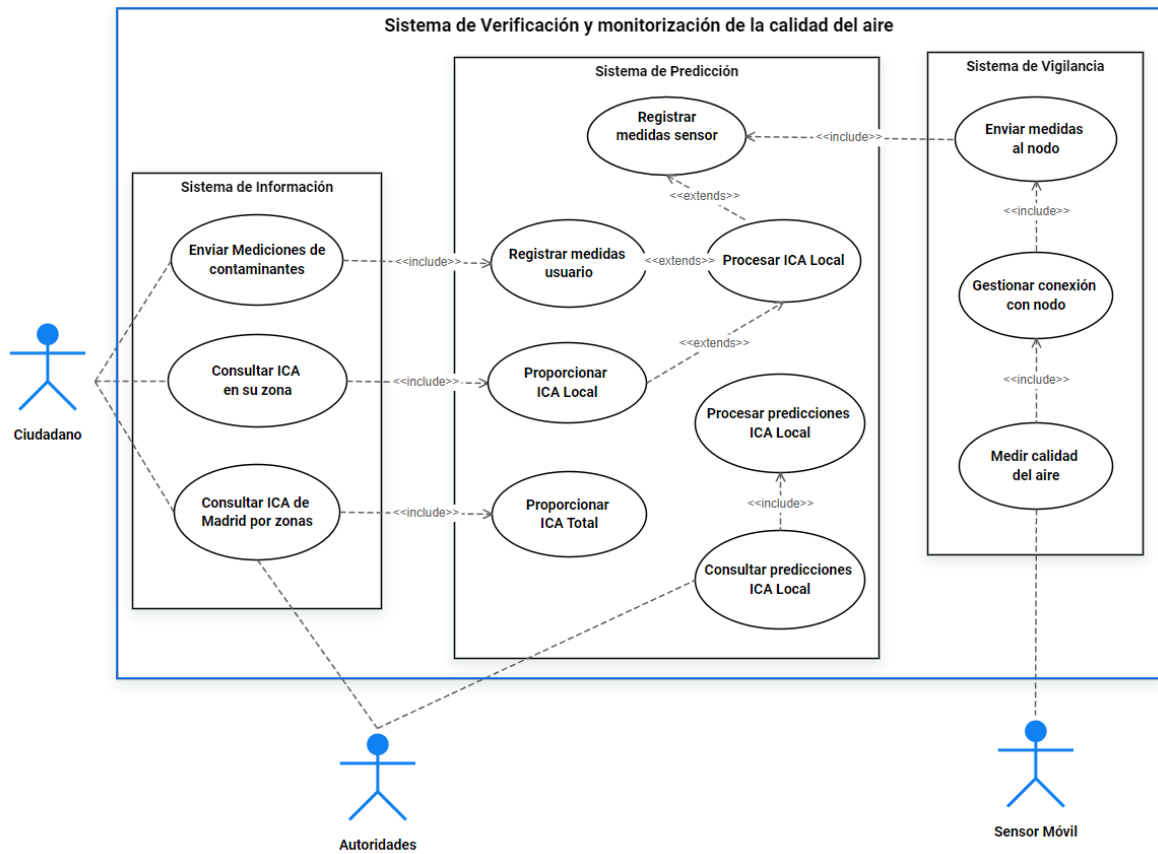


Figura 5. Diagrama de casos de uso

## **4. Descripción de la solución propuesta**

El presente capítulo detalla la solución propuesta para mejorar el sistema de monitorización y verificación de la calidad del aire en la ciudad de Madrid. Basándonos en los objetivos, especificaciones y requisitos analizados previamente, se plantea una solución que abarca la ampliación de la red de monitoreo, la mejora en la precisión de los datos, la descentralización del procesamiento y la actualización del sistema de información.

### **4.1 Arquitectura del Sistema**

La solución propuesta se enfoca en los siguientes aspectos:

**Sistema de Vigilancia:** Se integrarán sensores de calidad del aire en autobuses urbanos, incrementando la cobertura geográfica y la resolución espacial de las mediciones, sin causar un gran impacto en la adición de estos. Esto permitirá una monitorización más extensa y detallada de los niveles de contaminación en toda la ciudad.

**Sistema de Predicción:** Se implementarán algoritmos de predicción y validación de datos mediante redes LSTM para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones. Además, se descentralizará la infraestructura utilizando tecnologías de E-Computing y E-Caching para procesar los datos en el borde de la red. Esto mejorará la eficiencia del sistema y reducirá la latencia, permitiendo predicciones más rápidas y precisas de los niveles de contaminación.

**Sistema de Información:** Se rediseñará la aplicación móvil para ofrecer una interfaz más intuitiva y funcional, permitiendo a los usuarios consultar la calidad del aire en tiempo real. La nueva aplicación facilitará el acceso a información detallada y actualizada sobre la calidad del aire, mejorando la interacción y el servicio ofrecido a los ciudadanos.

La implementación del sistema completo se realiza de manera integrada y coordinada para optimizar la gestión de la calidad del aire. El sistema de vigilancia se encarga de recopilar datos en tiempo real mediante sensores móviles instalados en autobuses urbanos. Estos datos se procesan utilizando técnicas de E-Computing, lo que permite una rápida obtención de resultados. El sistema de predicción, entrenado con datos históricos y variables meteorológicas, utiliza estos datos procesados para generar predicciones precisas sobre la calidad del aire. Al final, el sistema de información comunica estos resultados y predicciones a través de una aplicación móvil, proporcionando a los ciudadanos y autoridades información actualizada y relevante. Se ofrece una visión general de la arquitectura del sistema completo en la figura 6. La integración de estos sistemas asegura una monitorización continua, predicciones precisas y una difusión eficaz de la información, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y la salud pública.

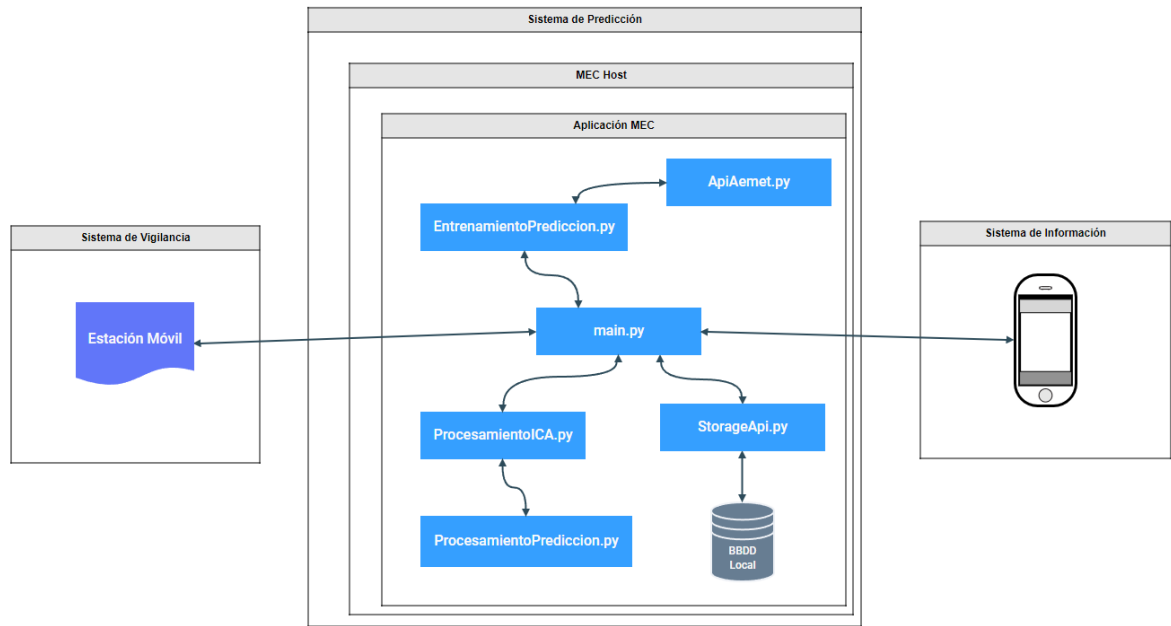


Figura 6. Arquitectura del Sistema

Todo el sistema será diseñado de manera modular y escalable, facilitando la incorporación de nuevos sensores y tecnologías en el futuro sin necesidad de realizar cambios significativos en la infraestructura existente.

## 4.2 Diseño Detallado

### 4.2.1 Sistema de Vigilancia

La solución específica para el Sistema de Vigilancia se basa en la integración de sensores de calidad del aire en los autobuses de la EMT de Madrid. Esta estrategia permite ampliar significativamente la cobertura geográfica y la resolución espacial de las mediciones de contaminantes atmosféricos, proporcionando datos más detallados y representativos de la calidad del aire en diferentes zonas de la ciudad.

Según el BOE, los contaminantes mínimos que deben ser monitoreados para calcular el índice de calidad del aire son [20]: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub>. Estos sensores se integrarán en los autobuses urbanos de la EMT para garantizar que todas las mediciones necesarias se realicen adecuadamente.

El objetivo de añadir sensores en los autobuses es incrementar el número de muestras y extender la zona geográfica de medición. El estudio [21] respalda la idea de realizar muestreos dinámicos en lugar de depender únicamente de estaciones fijas, demostrando la eficacia de este método para obtener datos más completos y precisos. La figura 7 muestra los gráficos de dispersión de promedios móviles de 1 minuto de O<sub>3</sub> comparados con las mediciones de sitios de referencia fijos (La Casa - Ciudad de Denver) de 1 minuto para diferentes clases de carreteras dentro de cinco zonas de distancia de los sitios de referencia fijos en el estudio de Denver. Los resultados indican una fuerte correlación entre las mediciones móviles y las fijas, lo que sugiere que las mediciones móviles son bastante precisas y comparables a las mediciones obtenidas en los sitios de referencia fijos. Las líneas de regresión por mínimos cuadrados ordinarios, representadas por las líneas rojas discontinuas, refuerzan esta conclusión al mostrar una tendencia de ajuste cercana a la línea de referencia roja. Esto valida la fiabilidad del enfoque de medición móvil para monitorizar la calidad del aire, especialmente en áreas urbanas con diferentes tipos de carreteras, proporcionando una herramienta valiosa para complementar las estaciones de monitoreo fijas existentes.

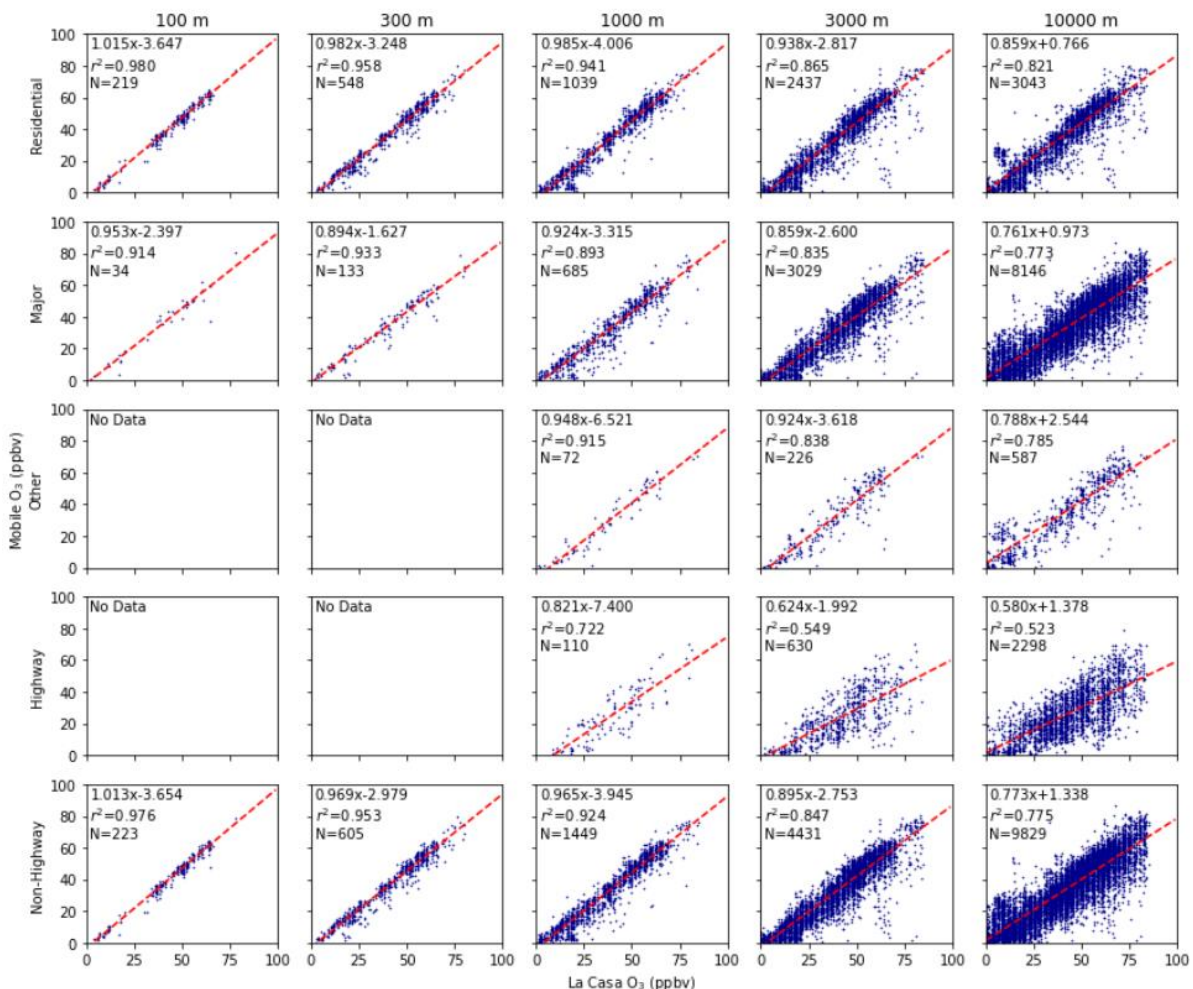


Figura 7. Comparación entre mediciones fijas y mediciones móviles [21]

Se seleccionan los autobuses de la EMT para este proyecto debido a que ya cuentan con una infraestructura de comunicaciones preparada para la conectividad 4G, provista por la empresa Teldat [22]. Estos autobuses están equipados con routers que ofrecen conexiones 4G/LTE, permitiendo proporcionar wifi gratuito a los pasajeros y, lo que es más importante, facilitando la transmisión de datos de los sensores de calidad del aire.

Los sensores instalados en los autobuses enviarán información sobre las mediciones realizadas a la Aplicación MEC en el Sistema de Predicción, que actúa como una API, de manera periódica. La información medida por los sensores será enviada al nodo 4G que proporciona servicios de comunicación en ese momento y que tendrá una estructura como se muestra en la figura 8. Será el propio router quien gestione la reconexión a otro nodo en caso de ser necesario. Es en los nodos donde se ubicará la aplicación MEC, asegurando así una transmisión de datos eficiente y en tiempo real.

```
{
  "hora": "yyyy-MM-dd HH:mm:ss",
  "coordenadas": "XXXX, YYYY",
  "estacion": "Identificador de la estación móvil",
  "medidas": {
    "SO2": XX,
    "NO2": XX,
    "PM2.5": XX,
    "PM10": XX,
    "O3": XX},
  ...
}
```

Figura 8. Estructura JSON de entrada para registrar medidas en la API

#### 4.2.2 Sistema de Predicción

El sistema de predicción se compone de una aplicación MEC situada en los e-nodoB que ofrecen servicios de comunicaciones móviles. Esta aplicación actuará como un servidor que procesa la información de los contaminantes recibida de los sensores instalados en los autobuses, calculando el índice de calidad del aire según se indica en [20] actualizando y almacenando localmente los índices calculados de forma periódica. Además de registrar la información de los sensores, la aplicación atenderá las solicitudes de los usuarios que se realicen a través de la aplicación móvil.

Para predecir la calidad del aire en tiempo real, el sistema empleará redes LSTM que generarán predicciones para cada contaminante. Estas predicciones se basarán en los valores históricos del índice de calidad del aire y factores meteorológicos obtenidos mediante la API de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) [23]. Este proceso incluye una fase de entrenamiento para crear un modelo predictivo, seguida de una fase de validación para asegurar su precisión, y finalmente, la generación de predicciones utilizando el modelo validado. El uso de LSTM se realiza mediante la biblioteca de Python Keras [24].

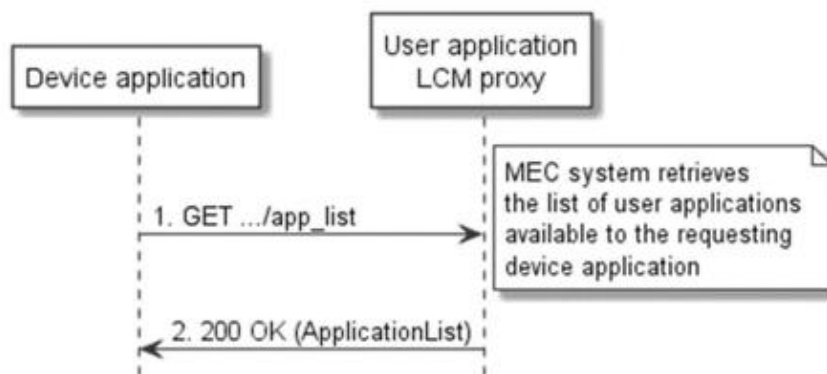
Los datos de los contaminantes se registran en ficheros Excel, mientras que los índices y predicciones calculados se almacenan en ficheros JSON. La elección de Excel para los contaminantes se justifica por su facilidad de uso y amplia adopción en la gestión de datos tabulares, lo que permite un acceso y análisis rápido de los datos brutos. Por otro lado, los ficheros JSON se utilizan para los índices y predicciones debido a su flexibilidad y eficiencia en la estructuración de datos complejos, así como su compatibilidad con aplicaciones web y APIs, facilitando la integración y el intercambio de información.

La aplicación MEC enviará diariamente la información calculada, tanto los índices de calidad como las predicciones, al servidor central del sistema actual para evitar la saturación de la memoria local. Asimismo, solicitará al servidor central la información de los demás nodos según la necesidad del usuario. De esta forma, este servidor actúa como un edge cache, optimizando el tráfico de datos y mejorando la eficiencia del sistema mediante técnicas de E-Computing.

#### **Conexión con la aplicación MEC**

Una estación de sensores instalada en un autobús urbano se conecta a un eNodoB a través de los routers instalados. Estos routers, garantizan una conexión robusta y constante con la red móvil, facilitando la transmisión de datos.

Una vez establecida la conexión con el eNodoB, la estación de sensores inicia el proceso de descubrimiento de la aplicación MEC que se encuentra alojada en el nodo. Este descubrimiento se realiza mediante el protocolo de descubrimiento de servicios implementado en la infraestructura MEC, que permite a la estación de sensores identificar y comunicarse con la aplicación específica encargada de procesar los datos de calidad del aire como se indica en la figura 9.



**Figura 9. Intercambio de mensajes para el descubrimiento de la aplicación MEC [17]**

Después de identificar la aplicación MEC específica, se procede a la creación de un contexto de aplicación, según la figura 10. Este proceso involucra el intercambio de mensajes que establecen los parámetros necesarios para la transmisión de datos, como la identificación de la estación de sensores, la configuración de los contaminantes a monitorear y los intervalos de transmisión. Este contexto de aplicación asegura que tanto la estación de sensores como

la aplicación MEC estén sincronizados y preparados para el intercambio continuo de información.

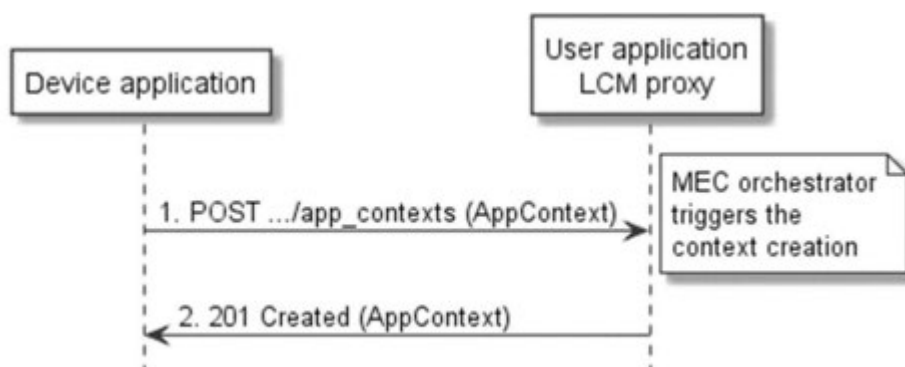


Figura 10. Intercambio de mensajes para la creación del contexto de aplicación MEC [17]

Una vez creado el contexto de aplicación, la estación de sensores empieza a enviar las medidas de los contaminantes, que incluyen SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub>. Estos datos se transmiten periódicamente a la aplicación MEC mediante llamadas a la API diseñada para este propósito. La API recibe las medidas, las procesa, y las almacena. Este flujo continuo de datos asegura que la aplicación MEC disponga de información actualizada y precisa para calcular el índice de calidad del aire en tiempo real, además de generar predicciones basadas en modelos de machine learning, proporcionando así una herramienta efectiva para la gestión y monitoreo ambiental. Cuando una estación de sensores cambia de eNodeB, la gestión del contexto de aplicación implica una serie de pasos que aseguran la continuidad de la transmisión de datos. Este proceso se conoce como handover y se gestiona a través de la infraestructura de red móvil y la arquitectura MEC. A continuación, se detalla cómo se maneja este cambio:

#### Detección del Cambio de eNodeB

El router del autobús detecta que se está alejando del área de cobertura del eNodeB actual y se está acercando al área de cobertura de un nuevo eNodeB. Este cambio es detectado mediante la monitorización continua de la intensidad de la señal y otros parámetros de la red.

#### Iniciación del Handover

Una vez detectado el cambio, el router inicia el proceso de handover, comunicando al eNodeB actual su intención de transferir la conexión al nuevo eNodeB. Este proceso incluye la transferencia de información crítica de contexto de la aplicación al nuevo eNodeB.

#### Transferencia del Contexto de Aplicación

El eNodeB actual coordina con el nuevo eNodeB para transferir el contexto de la aplicación. Esta transferencia incluye parámetros de configuración, identificadores de sesión, y cualquier dato temporal que sea necesario para continuar la transmisión de datos sin interrupciones. El nuevo eNodeB recibe y almacena esta información para prepararse para la llegada de la estación de sensores.

### Restablecimiento de la Conexión

El router del autobús establece una nueva conexión con el nuevo eNodoB. Durante este proceso, se asegura que el contexto de la aplicación transferido esté correctamente configurado en el nuevo eNodoB.

### Redescubrimiento de la Aplicación MEC

En algunos casos, el nuevo eNodoB puede requerir que la estación de sensores redescubra la aplicación MEC, especialmente si la aplicación está localizada en una infraestructura diferente. Esto se hace automáticamente utilizando el protocolo de descubrimiento de servicios de la red MEC.

### Reanudación de la Transmisión de Datos

Una vez que el contexto de la aplicación está configurado y la aplicación MEC ha sido redescubierta si es necesario, la estación de sensores reanuda la transmisión de datos de contaminantes al nuevo eNodoB. La aplicación MEC continúa procesando estos datos como antes, sin pérdida de información ni interrupciones significativas.

Este proceso asegura que, durante el movimiento y el cambio de puntos de conexión en la red móvil, la transmisión de datos de calidad del aire desde la estación de sensores a la aplicación MEC sigue siendo continua.

Se proporciona una visión general del proceso de conexión con otros nodos en la figura 11.

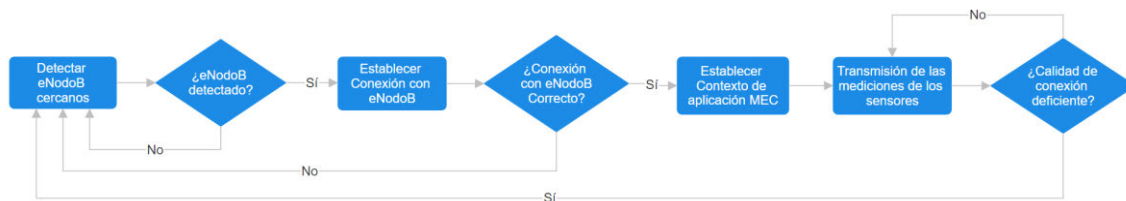


Figura 11. Diagrama de flujo para la conexión con los nodos de comunicación de una estación móvil

### Aplicación MEC

La aplicación ha sido desarrollada utilizando el framework FastAPI en Python [25]. La API permite registrar y obtener medidas de contaminantes del aire, y realiza un procesamiento periódico de estos datos. La estructura de ficheros del servidor está organizada a partir de una carpeta principal denominada "Data", la cual contiene tres subcarpetas clave: "Input", "Output" y "Model". La carpeta "Input" alberga los archivos de datos que se reciben para ser procesados, como los registros iniciales de los sensores de calidad del aire y la tabla del Índice Nacional de la Calidad del Aire [20]. La carpeta "Output" se utiliza para almacenar los resultados procesados, incluyendo los registros locales y totales en formatos Excel y JSON, además de las predicciones calculadas. Finalmente, la carpeta "Model" contiene los modelos de predicción generados, los cuales se utilizan para anticipar los niveles de contaminación. Para el desarrollo de la API, se han implementado diversas clases con el objetivo de gestionar eficientemente las funcionalidades requeridas, que se explicarán en el apartado de Implementación.

### **4.2.3 Sistema de Información**

La solución específica desarrollada para el sistema de información consiste en una aplicación móvil codificada en Java utilizando Android Studio [26]. Esta aplicación proporciona actualizaciones en tiempo real sobre los niveles de contaminantes en diversas áreas urbanas. Utiliza información recopilada por el sistema de vigilancia y procesada por el sistema de predicción para ofrecer pronósticos precisos y alertas relevantes. También permite a los usuarios consultar la calidad del aire en su ubicación actual, recibir notificaciones sobre cambios significativos, y participar activamente añadiendo sus propias mediciones. De esta manera, el sistema de información mejora la transparencia y accesibilidad de los datos ambientales.

Para el desarrollo de la aplicación móvil usando esta herramienta, se han diseñado cuatro pantallas diferentes con funcionalidades específicas. Cada pantalla ha requerido tanto el diseño y la codificación de una parte gráfica correspondiente a la interfaz de usuario, como la implementación de la lógica de código que ejecuta todas las llamadas a la API y los procesamientos necesarios. En la parte gráfica, se ha trabajado en la disposición y estilo de los elementos para asegurar una interacción intuitiva y fluida con el usuario. En la parte de código, se han integrado las funcionalidades necesarias para la obtención y procesamiento de datos en tiempo real, así como para la comunicación con el servidor.

## 4.3 Implementación del Sistema

### 4.3.1 Implementación del Sistema de Vigilancia

Para implementar este sistema, se realizará una simulación utilizando un programa desarrollado específicamente para este propósito. Este programa recogerá información en tiempo real del sistema de monitoreo actual y simulará sensores situados en las líneas 132 y 27 de los autobuses de Madrid. Para el desarrollo del programa, se han codificado dos proyectos en Python. El primero, "SistemaDeVigilancia", se encarga de obtener automáticamente los datos actuales en tiempo real del portal oficial de calidad del aire de Madrid, en un fichero XML que contiene la información de las medidas de cada contaminante de cada estación por cada hora. Este fichero, sin embargo, posee una estructura compleja e ineficiente para el manejo de datos, como se muestra en la figura 12. Contiene datos sobre los contaminantes específicos, identificando el contaminante entre las etiquetas de <magnitud>, junto con los valores correspondientes de cada hora del día, presentados mediante las etiquetas <HXX>VALOR<HXX>, donde "HXX" representa la hora de la medición y "VALOR" el valor numérico asociado a dicha medición. Además de estos datos, el sistema proporciona información adicional como la identificación de la estación y el municipio al que pertenece, la fecha y si la medida es válida.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Datos>
  <Dato_Horario>
    <provincia>28</provincia>
    <municipio>079</municipio>
    <estacion>004</estacion>
    <magnitud>1</magnitud>
    <punto_muestreo>28079004_1_38</punto_muestreo>
    <ano>2024</ano>
    <mes>03</mes>
    <dia>16</dia>
    <H01>3</H01>
    <V01>V</V01>
    <H02>3</H02>
    <V02>V</V02>
    <H03>2</H03>
    <V03>V</V03>
    <H04>2</H04>
    <V04>V</V04>
    <H05>2</H05>
    <V05>V</V05>
    <H06>1</H06>
    ...
  </Dato_Horario>
  <Dato_horario>
    ...
```

Figura 12. Fichero XML del portal de calidad del aire de Madrid, con los datos de las medidas en tiempo real

Para facilitar su manejo, se ha decidido parsear el fichero XML a un fichero JSON que muestra las medidas de cada estación de la última hora de manera más sencilla y comprensible, presentando un ejemplo en la figura 13.

```
"medidas": [  
  {  
    "estacion": "004",  
    "datos": {  
      "SO2": "2",  
      "CO": "0.3",  
      ...  
    }  
  }, {  
    "estacion": "008",  
    "datos": {  
      "SO2": "2",  
      ...  
    }  
  }  
]
```

**Figura 13. Fichero JSON con los datos reales de la última hora del fichero XML**

El segundo proyecto, "SimuladorSistemaDeVigilancia", utiliza este fichero JSON parseado y otro fichero que contiene las coordenadas de las rutas de los buses seleccionados. Realiza una petición periódica al sistema de predicción de registrar medidas, utilizando las coordenadas del fichero de coordenadas, localiza la estación más cercana geográficamente y obtiene las medidas de esta estación del fichero JSON, simulando un bus recorriendo su ruta con un sensor de calidad del aire instalado.

La elección de las líneas de autobuses 132 y 27 se basa en su proximidad a las estaciones fijas de medición de la calidad del aire, lo que permite simular las mediciones móviles con las fijas. Esta correlación asegura la verosimilitud de la simulación, maximizando su utilidad y demostrando la eficacia del sistema de monitoreo dinámico. Además, esta elección mejora la cobertura y la resolución espacial de las mediciones, complementando la información de las estaciones fijas y fortaleciendo la fiabilidad del sistema de vigilancia propuesto. Posteriormente, enviará a la API la información de cada contaminante junto con las coordenadas simuladas de las rutas de estos autobuses. Esta simulación permitirá evaluar el rendimiento del sistema propuesto y ajustar cualquier aspecto necesario para una implementación definitiva.

En la figura 14, se muestran las líneas de autobuses seleccionadas (línea 132 en azul, y línea 27 en morado, además de las posiciones de las estaciones fijas, identificadas con un marcador naranja.

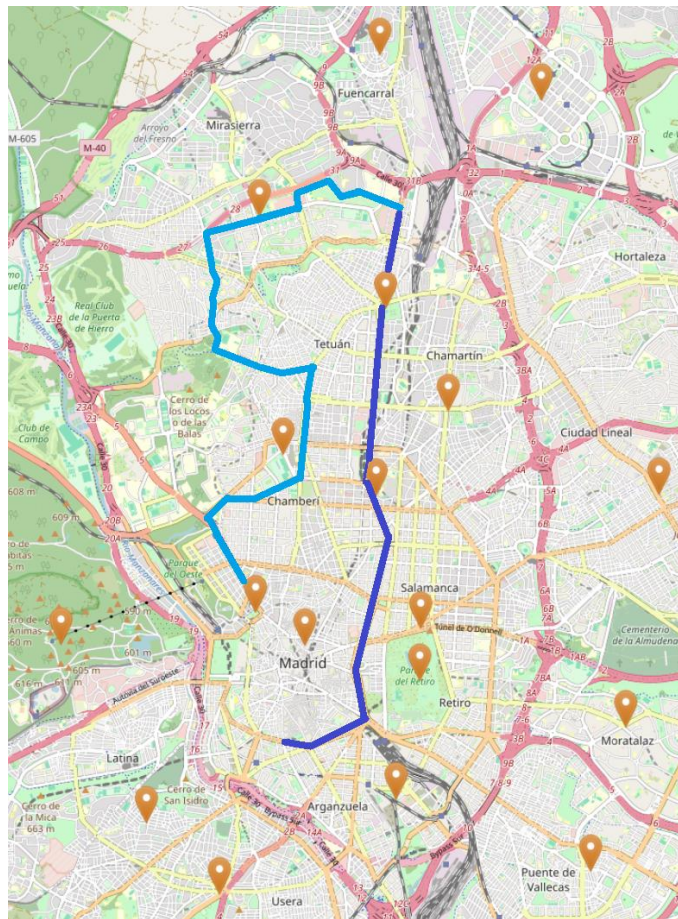


Figura 14. Mapa con las estaciones fijas actuales y las rutas de buses seleccionadas

### 4.3.2 Implementación del Sistema de Predicción

La simulación del sistema de Predicción se ha llevado a cabo ejecutando el servidor en un ordenador, alojando el servidor en la IP del ordenador y utilizando el puerto 8000, que es el puerto por defecto de FastAPI. El servidor se ha reconfigurado para que las tareas periódicas se realicen cada 5 minutos, para facilitar el análisis de las pruebas realizadas. Los datos de entrada se reciben del sistema de vigilancia simulado, el cual genera datos de calidad del aire como si provinieran de sensores instalados en autobuses. Durante esta simulación, tanto el sistema de vigilancia como el sistema de predicción y el de información han operado localmente, lo que ha impedido probar la conectividad 4G/LTE que se utilizaría en un entorno real. Esta configuración ha permitido validar el procesamiento y almacenamiento de datos, así como la ejecución de tareas periódicas, asegurando que el sistema funcione correctamente bajo condiciones controladas. A continuación, se detallan las clases codificadas:

- `main.py`: Esta clase constituye el núcleo de la aplicación, encargándose de manejar todas las solicitudes recibidas por el servidor. Por cada petición, identifica el endpoint correspondiente y ejecuta la función asociada a dicho endpoint, cuyas descripciones se proporcionan posteriormente (apartado Endpoints definidos). Además, esta clase gestiona los archivos que contienen información sobre las mediciones de los sensores y los ICAs calculados. Asimismo, se encarga del procesamiento de los datos para la

obtención de índices y predicciones mediante los modelos predictivos generados de forma periódica. Por último, verifica las medidas registradas por los usuarios de la aplicación, utilizando la media y la desviación típica calculadas a partir de los datos de los archivos de registros. Es importante destacar que este código incluye una configuración inicial, cuyos parámetros se abordarán en detalle en la sección Parámetros Iniciales.

- `StorageAPI.py`: Este módulo contiene las bibliotecas necesarias para el manejo de archivos en formatos Excel y JSON, así como para las operaciones relacionadas con el sistema operativo Windows. Su función principal es facilitar la generación, modificación y verificación de la existencia de archivos.
- `ProcesamientoICA.py`: En esta clase se llevan a cabo todos los cálculos matemáticos necesarios para obtener los ICA. Estos cálculos se basan en promedios aritméticos y en promedios móviles con diferentes ventanas temporales, dependiendo del tipo de contaminante que se está procesando.
- `APIAemet.py`: Esta clase se encarga de obtener, mediante una llamada a la API de la AEMET, información relevante como temperatura, precipitación, nieve, humedad relativa y velocidad del viento, correspondientes a la última hora y a las previsiones en el municipio de Madrid.
- `EntrenamientoPrediccion.py`: Aquí se encuentran las bibliotecas necesarias para el entrenamiento de modelos predictivos utilizando Keras, Sequential, LSTM y Dense. Estos modelos se generan considerando la información climatológica obtenida previamente. El proceso de generación del modelo implica la construcción de dos conjuntos de datos: uno basado en información climática y otro en registros de un contaminante específico. A continuación, se construye un modelo LSTM con cinco características de entrada (temperatura, humedad, viento, nieve y precipitación), se compila, se entrena y se genera el modelo. Este proceso se repite hasta obtener un modelo validado.
- `ProcesamientoPrediccion.py`: Finalmente, esta clase carga el modelo generado y realiza predicciones utilizando los datos climáticos actuales.

La implementación de estas clases permite el funcionamiento integral del sistema de monitorización y verificación de la calidad del aire en la ciudad de Madrid mostrando un diagrama de clases descriptivo en la figura 15.

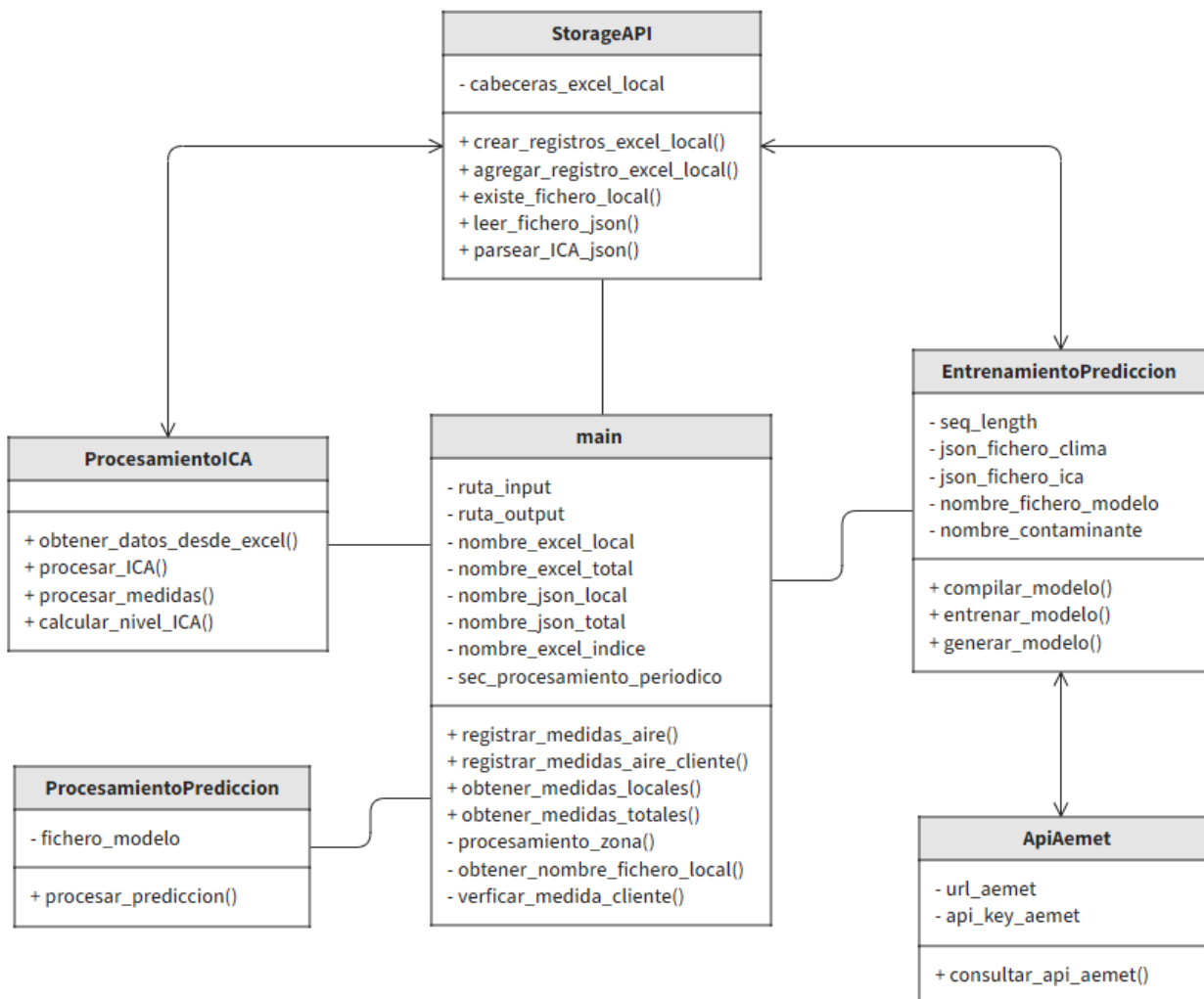


Figura 15. Diagrama de clases UML del sistema de predicción

### Parámetros Iniciales

Los parámetros que se listan a continuación corresponden a los valores iniciales necesarios para la puesta en marcha de la aplicación MEC, y que se pueden encontrar en el fichero de main.py.

- Coordenadas del nodo. Ya que el cálculo del ICA se relaciona con la ubicación del nodo donde ha sido calculado.
- Rutas y nombres de archivos para guardar datos de entrada y salida.
- Intervalo de tiempo para el procesamiento periódico (quince minutos). De esta forma se actualizará el ICA cuatro veces cada hora.
- Definición de la Clase de “Medida Sensor”. Define y la valida la estructura de los datos que se recibirán, con atributos como hora, coordenadas, estación, y medidas (un diccionario con las medidas de los contaminantes).

**Endpoints definidos**

En la tabla 1, se definen los métodos y los endpoint que ofrece la aplicación MEC.

**Tabla 1. Endpoint definidos del Sistema de Predicción**

Método	Endpoint	Descripción
POST	registrarmedidasaire	Recibe datos de los sensores, verifica y crea el archivo Excel local si no existe, y guarda los datos en dicho archivo. Responde con un mensaje de éxito.
POST	registrarmedidascliente	Recibe datos de los clientes, desde el Sistema de Información, verifica y crea el archivo Excel local si no existe, guarda los datos en dicho archivo y los valida. En caso de ser validados, los datos se añaden al fichero con las medidas locales registradas para su posterior procesamiento. En caso contrario, no se añadirán a dicho fichero.
GET	medidaslocales	Devuelve las medidas locales desde un archivo JSON si existe, o lanza una excepción HTTP 404 si no se encuentra el archivo.
GET	medidastotales	Similar al anterior, pero para las medidas totales.
GET	prediccioneslocales	Devuelve las predicciones locales desde un archivo JSON si existe, o lanza una excepción HTTP 404 si no se encuentra el archivo.
GET	predicciones_totales	Similar al anterior, pero para las predicciones totales.

**Procesamiento periódico**

Este procesamiento consiste en una tarea asíncrona que se ejecuta cada quince minutos, y es la encargada de procesar los datos de la calidad del aire registrados localmente en la carpeta "Input", mostrando un ejemplo en la figura 16. Este proceso implica leer los datos de los sensores, calcular el ICA de cada contaminante, su correspondiente predicción y almacenar los resultados en un archivo JSON en la carpeta "Output". Esta rutina asegura que los datos estén actualizados y disponibles para las solicitudes de los usuarios en tiempo real.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1	Hora	Latitud	Longitud	Id_Estacio	SO2	CO	NO	NO2	PM2.5	PM10	NOx	O3	TOL	BEN	EBE	MXV	PXY	OXY	TCH	CH4	
2	2024-04-20 18:38:30	40.480937	-3.691329	50		0	0	0,2	2,6	4,8	13,3	3,5	0	1,5	0,8	0,7	0	0	0	0	0
3	2024-04-20 18:38:37	40.481602	-3.694355	50		1,1	-0,7	0,3	3,6	5,1	13,2	3	0	0,8	1,2	-0,4	0	0	0	0	0
4	2024-04-20 18:38:44	40.481345	-3.697093	39		0	0	1	5,3	0	0	5,4	109,8	0,3	-0,3	-0,1	0	0	0	0	0
5	2024-04-20 18:38:51	40.483135	-3.699684	39		0,3	-0,6	1	5	0	0	5,4	110,1	-0,3	1	-0,7	0	0	0	0	0
6	2024-04-20 18:38:59	40.482153	-3.70235	39		0,9	0,2	1,1	4,2	0	0	6,7	109,7	0,1	-0,5	0,5	0	0	0	0	0
7	2024-04-20 18:39:06	40.480217	-3.702882	39		1,2	-0,5	1,1	5,3	0	0	6,4	109	0,5	0,1	1	0	0	0	0	0
8	2024-04-20 18:39:13	40.47896	-3.706741	39		0,5	1,1	1,3	4,3	0	0	5,6	109,2	-0,2	-0,6	0,5	0	0	0	0	0
9	2024-04-20 18:39:20	40.478281	-3.709724	39		0	0,3	0,1	4,6	0	0	5,8	109,2	0,8	-0,3	1,1	0	0	0	0	0
10	2024-04-20 18:39:27	40.47804	-3.710897	39		0,5	0,9	1,4	4,4	0	0	6,9	109,8	1,2	0,8	1	0	0	0	0	0
11	2024-04-20 18:39:34	40.477034	-3.715396	39		0	0	0,5	5,4	0	0	6,4	109,3	1,2	1,1	0	0	0	0	0	0
12	2024-04-20 18:39:41	40.475719	-3.716425	39		0,3	0,4	0,7	4,2	0	0	6,4	109,5	0,6	0,3	0,3	0	0	0	0	0
13	2024-04-20 18:39:48	40.475306	-3.718278	39		0	0	1,9	4,2	0	0	6,9	110,2	1,3	0	-0,3	0	0	0	0	0
14	2024-04-20 18:39:55	40.47378	-3.720517	39		0	0	2	5,6	0	0	5,5	109,8	0	0	0	0	0	0	0	0
15	2024-04-20 18:40:02	40.472346	-3.720258	39		0	0	1,7	5	0	0	5,8	109,4	0	0	0	0	0	0	0	0
16	2024-04-20 18:40:09	40.469676	-3.719245	39		0	0	1,1	5,6	0	0	5,7	109,1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	2024-04-20 18:40:16	40.468073	-3.719472	39		0	0	1,4	4,3	0	0	6,8	109,8	0	0	0	0	0	0	0	0
18	2024-04-20 18:40:24	40.465425	-3.719091	39		0	0	1,6	4,9	0	0	5,8	110	0	0	0	0	0	0	0	0
19	2024-04-20 18:40:31	40.462829	-3.719983	39		0	0	1,8	4,8	0	0	6,8	110,6	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2024-04-20 18:40:38	40.462585	-3.719746	39		0	0	1,2	4,2	0	0	5,7	109,9	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2024-04-20 18:40:45	40.46267	-3.718186	39		0	0	1,9	5,2	0	0	6	109,3	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2024-04-20 18:40:52	40.463195	-3.715254	39		0	0	0,5	5,3	0	0	5,8	109,3	0	0	0	0	0	0	0	0
23	2024-04-20 18:40:59	40.463068	-3.713347	39		0	0	1,5	5,6	0	0	6,8	109,3	0	0	0	0	0	0	0	0
24	2024-04-20 18:41:06	40.46003	-3.712393	38		0	0	1,1	11,2	6	19,3	14,6	0	1	0	1	0	0	0	0	0

**Figura 16. Fichero Excel de ejemplo de registro de las medidas de los sensores**

### 4.3.3 Implementación del Sistema de Información

A continuación, se detalla el diseño y las funcionalidades de cada una de las pantallas que componen la aplicación móvil del Sistema de Información.

#### Pantalla de Inicio

Para el desarrollo de la pantalla de inicio, se ha codificado la clase `MainActivity.java` y su correspondiente interfaz gráfica en `activity_main.xml`. El archivo XML cuenta con seis elementos que se presentan en la pantalla de forma vertical y secuencial. El primer elemento es el logo provisional de la aplicación. Bajo este, se encuentra el nombre de la aplicación, `icaMad`, que hace referencia al índice de calidad del aire de Madrid. En el centro de la pantalla, se disponen tres botones en vertical con los textos: "Información medidas", "Mostrar Mapa" y "Añadir Medida". Finalmente, en la parte inferior izquierda de la pantalla, se muestra información sobre la versión de la aplicación y los desarrolladores como se presenta en la figura 17.

En cuanto a la lógica, el archivo `MainActivity.java`, además de instanciar todos los elementos visuales, incluye los Endpoints de las peticiones `"/medidaslocales"` y `"/medidastotales"`. Al iniciarse la aplicación, realiza estas peticiones por primera vez para contar con la información necesaria. Además de estas funcionalidades, la aplicación está diseñada para detectar cambios en el ICA ofrecido por el nodo o, si se detecta un cambio de `eNodoB`, la aplicación verifica el índice de calidad del aire genérico del nuevo nodo. En caso de que este índice se clasifique como Regular, Desfavorable, Muy Desfavorable o Extremadamente Desfavorable, la aplicación avisará al usuario mediante una notificación con el mensaje indicado en la figura 18. Esto se logra mediante la configuración de un canal de notificación y la creación de una tarea periódica que realiza llamadas a la API del tipo `"/medidaslocales"` con el objetivo de mantener la información actualizada. Esta característica asegura que los usuarios estén siempre informados sobre la calidad del aire en su ubicación actual, mejorando así la capacidad de respuesta y la toma de decisiones relacionadas con su salud y bienestar.

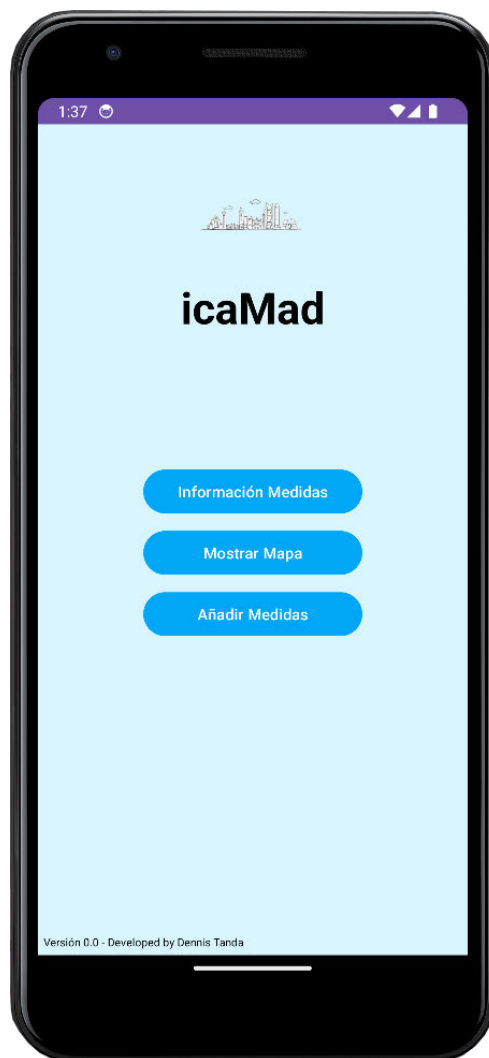


Figura 17. Pantalla de inicio de la aplicación móvil

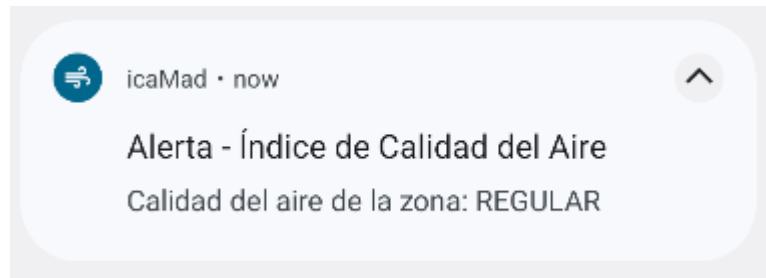


Figura 18. Notificación de la aplicación, alertando del ICA perjudicial de la zona

### Pantalla Información Medidas

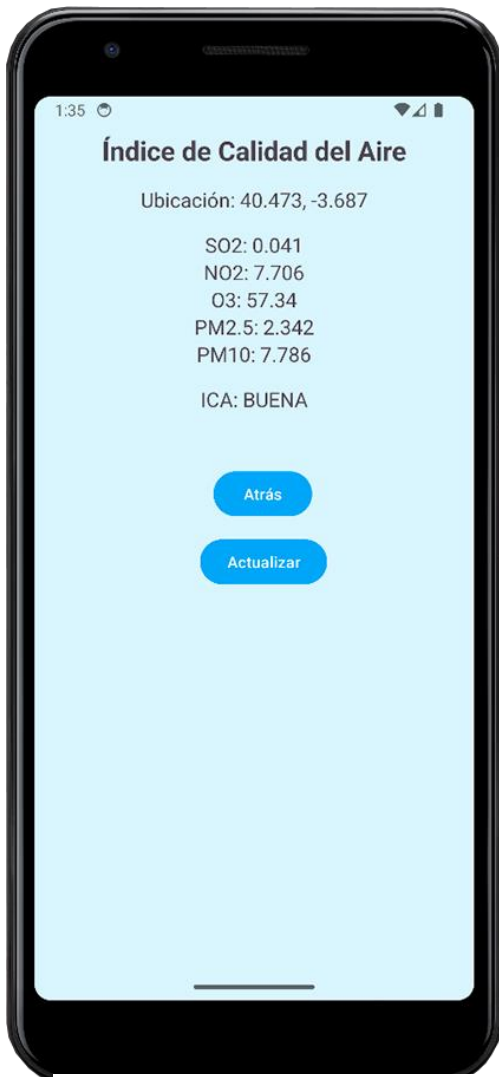


Figura 19. Pantalla Información Medidas

Para acceder a esta pantalla, el usuario debe haber pulsado el botón "Información medidas" en la pantalla de inicio. Los archivos que componen esta pantalla son InfoActivity.java y el archivo XML activity\_info.xml. Esta pantalla tiene como título "Índice de Calidad del Aire" y muestra la siguiente información: la ubicación del nodo que está procesando las peticiones de la aplicación, el valor numérico de los principales contaminantes (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y la clasificación del índice genérico de la zona. Esta información se obtiene de la llamada a la API realizada en la pantalla de inicio.

Debajo de la sección de información, se encuentran dos botones. El primero, con el texto "Atrás" que permite al usuario volver a la pantalla de inicio. El segundo, con el texto "Actualizar", cuando es presionado, realiza una nueva petición de las medidas locales, actualiza la información en la pantalla con los nuevos datos y muestra un mensaje notificando al usuario que la información ha sido actualizada. La implementación de estos elementos permite que los usuarios puedan acceder y actualizar la información relevante sobre la calidad del aire en tiempo real, mejorando su capacidad para tomar decisiones informadas sobre su entorno inmediato. Se muestra un ejemplo en la figura 19.

### Pantalla Mostrar Mapa

Para acceder a la pantalla de Mostrar Mapa, representada en la figura 20, se debe presionar el botón "Mostrar Mapa" en la pantalla de inicio. Al igual que la pantalla de Información de Medidas, esta pantalla utiliza los datos obtenidos en la primera llamada realizada al iniciarse la aplicación, que incluye toda la información detallada de los contaminantes de cada nodo MEC de la ciudad. Esta información abarca los datos de cada contaminante medido por cada nodo, permitiendo dibujar en el mapa de la ciudad de Madrid, mediante la herramienta de Google Maps proporcionada por Android Studio, círculos de colores cuyo centro representa cada nodo. El color de cada círculo depende del índice de calidad del aire, siguiendo el código de colores mostrado en la tabla 2.

Adicionalmente, mediante el uso de las librerías FusedLocationProviderClient y LocationServices, y con los permisos de ubicación del dispositivo adecuados, se puede determinar la ubicación real del usuario de la aplicación. Esto permite centrar el mapa en la ubicación actual del usuario, proporcionando una visualización precisa y personalizada de la calidad del aire en su entorno inmediato. Por último, esta pantalla cuenta con el botón "Atrás" en la parte inferior derecha, para volver a la pantalla de Inicio. El código que contiene la lógica de esta pantalla se encuentra en los ficheros MapsActivity.java y activity\_maps.xml.

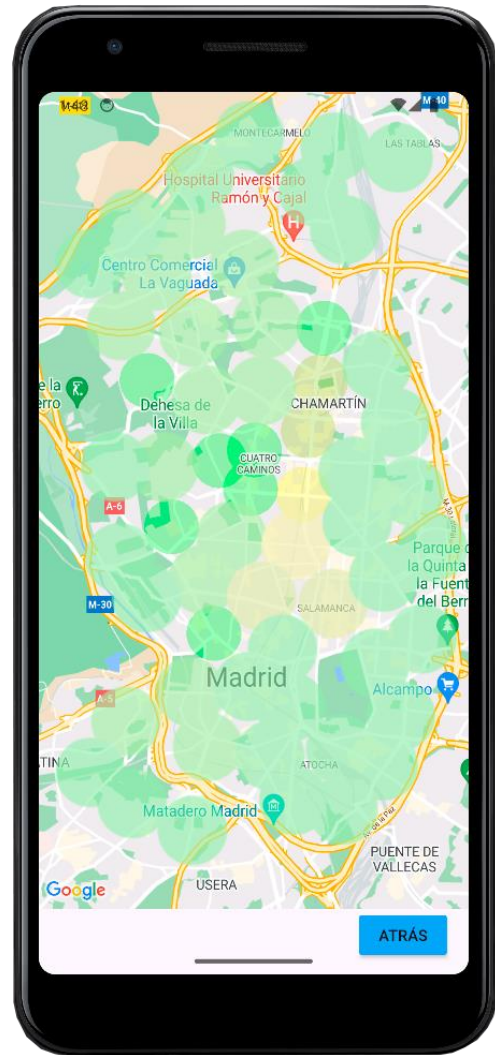


Figura 20. Pantalla Mostrar Mapa

Esta pantalla mejora la capacidad de los usuarios para visualizar y comprender la distribución de la calidad del aire en toda la ciudad, facilitando una toma de decisiones más informada.

Tabla 2. Codificación por colores según ICA

Clasificación ICA	Color	Código Color RGB
BUENA	Verde	0,255,0
RAZONABLEMENTE BUENA	Verde Oscuro	153,204,0
REGULAR	Amarrillo	255,255,0
DESFAVORABLE	Naranja	255,102,0
MUY DESFAVORABLE	Rojo Oscuro	128,0,0
EXTREMADAMENTE DESFAVORABLE	Morado	102,0,102
Sin Información	Blanco	255,255,255

### Pantalla Añadir Medida

La pantalla Añadir Medida, accesible desde el botón "Añadir Medida" en la pantalla de inicio, permite a los usuarios introducir manualmente valores de contaminantes medidos con dispositivos externos. La codificación de esta funcionalidad se encuentra en los archivos AddActivity.java y activity\_add.xml. En esta pantalla, se presenta un formulario que permite al usuario ingresar valores numéricos para cada contaminante que el sistema de monitoreo actual es capaz de detectar, como se puede ver en la figura 21.

Además del botón "Atrás", que permite regresar a la pantalla de inicio, esta pantalla cuenta con el botón "Enviar". La función de este botón es realizar una petición POST a la API correspondiente, utilizando el endpoint /registrarmedidascliente. Para garantizar la integridad de los datos ingresados y gestionar el control de errores, se han implementado varias validaciones:



- Validación de Campos Vacíos: Si el usuario intenta enviar el formulario sin haber introducido ningún valor, se muestra un mensaje de advertencia indicando que no se ha ingresado ningún dato.
- Restricción de Valores Numéricos: Los campos del formulario están configurados para aceptar únicamente valores numéricos, evitando así la entrada de datos inválidos.
- Confirmación de Envío: Tras enviar la información, se muestra un mensaje de confirmación informando al usuario que los datos se han enviado con éxito y que el servidor procesará las medidas internamente para determinar su validez.

Esta funcionalidad no solo facilita la participación activa de los ciudadanos en el monitoreo de la calidad del aire, sino que también asegura que los datos proporcionados sean precisos y útiles para el sistema. La validación interna de las medidas enviadas garantiza que solo los datos válidos se integren en el sistema, mejorando así la calidad y fiabilidad de la información recolectada.

Figura 21. Pantalla Añadir Medidas

## 5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas para evaluar el funcionamiento y la eficacia del sistema de monitorización y predicción de la calidad del aire en entornos urbanos. Las pruebas se llevaron a cabo con el objetivo de asegurar que todos los componentes del sistema funcionen de manera integrada y eficiente, proporcionando información precisa y oportuna sobre la calidad del aire. Las pruebas realizadas se constan de tres fases:

La primera fase de las pruebas consistió en ejecutar la Aplicación MEC configurada adecuadamente, en un ordenador que actúa como el host del servidor. Una vez configurado, el servidor está a la espera de recibir peticiones de datos del sistema de vigilancia. Este paso fue crucial para asegurar que el servidor estuviera correctamente preparado para gestionar las solicitudes de datos en tiempo real. Para la puesta en marcha del servidor se realiza con el siguiente comando, mostrado en la figura 22, y como resultado, indicando el host, y el puerto donde se aloja el servidor, en un navegador, obtenemos por pantalla el mensaje de Servidor Iniciado, como en la figura 23.

```
PS D:\Escritorio\TELECO\9 PFG\WorkspaceSPCA> uvicorn main:app --host 192.168.1.41 --port 8000 --reload
INFO: Will watch for changes in these directories: ['D:\Escritorio\TELECO\9 PFG\WorkspaceSPCA']
INFO: Uvicorn running on http://192.168.1.41:8000 (Press CTRL+C to quit)
INFO: Started reloader process [12552] using StatReload
INFO: Started server process [9928]
INFO: Waiting for application startup.
Servidor Edge lanzado
INFO: Application startup complete.
```

Figura 22. Comando y logs de la puesta en marcha de la aplicación MEC

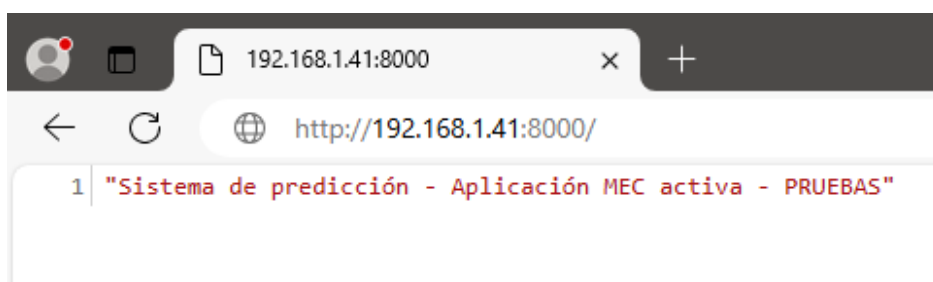


Figura 23. Mensaje de verificación del correcto funcionamiento de la aplicación MEC

En la segunda fase, se ejecutó el simulador del sistema de vigilancia en el mismo ordenador. Este simulador se encargó de realizar registros periódicos de medidas reales de contaminantes obtenidas del sistema de vigilancia actual obtenidas y parseadas en un fichero JSON como se representa en la figura 24.

```
PS D:\Escritorio\TELECO\9 PFG\WorskSpaceSVCA> & "d:/Escritorio/TELECO/9 PFG/WorskSpaceSVCA/.venv/Scripts/python.exe
Línea modificada exitosamente.
Archivo XML descargado correctamente como 'SistemaDeVigilancia/Data/Input/vigilancia_20240612.xml'.
Se ha generado el fichero JSON SistemaDeVigilancia/Data/Output/vigilancia_parseo_20240612.json de forma correcta
```

Figura 24. Logs indicando la correcta obtención y generación del fichero JSON con las medidas en tiempo real



## 5.1 Sistema de Vigilancia

Para validar esta solución, se realizó una simulación utilizando un programa desarrollado en Python. Este programa realiza llamadas periódicas a la API mediante el método POST /registrarmedidasaire, registrando medidas de los contaminantes junto con la información de la ubicación simulada para las rutas de las líneas 132 y 27 de los autobuses de Madrid. Los datos enviados a la API son proporcionados por las estaciones fijas más cercanas a la ubicación simulada obtenidas del portal actual de la Calidad del Aire. Cabe destacar que esta simulación se realizó de forma local y no se pudo probar la conexión a un eNodoB ni el proceso de establecimiento de contexto de la aplicación MEC.

La simulación mostró que los sensores móviles aumentan significativamente la cobertura geográfica de las mediciones de la calidad del aire, proporcionando datos valiosos de áreas que no están cubiertas por las estaciones fijas. La información recopilada permitió crear mapas detallados de la calidad del aire en diferentes zonas de la ciudad, mejorando la capacidad de monitoreo y respuesta ante posibles picos de contaminación. Además, se comprobó que los datos recogidos por los sensores móviles eran coherentes y se almacenaban correctamente en los ficheros Excel y JSON según lo previsto en el diseño del sistema.

Los resultados confirman que el sistema de vigilancia basado en sensores móviles no solo es efectivo para complementar las estaciones fijas, sino que también mejora la capacidad de monitoreo de la calidad del aire en zonas urbanas. La capacidad de registrar y procesar datos en tiempo real permitió una respuesta rápida y eficiente ante variaciones en la calidad del aire, demostrando así la viabilidad y utilidad del sistema de monitoreo dinámico propuesto. La simulación permitió identificar y ajustar aspectos técnicos, preparando el sistema para su implementación en un entorno real.

## 5.2 Sistema de Predicción

Se probó el sistema de predicción ejecutando la aplicación MEC en un servidor local. El servidor procesó los datos de contaminantes recibidos de los sensores simulados, calculó el ICA y realizó predicciones utilizando redes LSTM. La periodicidad del procesamiento se configuró para ejecutarse cada 5 minutos.

Las pruebas mostraron que el servidor local podía manejar eficazmente las tareas periódicas de procesamiento y generar predicciones precisas del ICA. Los resultados obtenidos han demostrado ser correctos, ya que coinciden estrechamente con los datos proporcionados en el portal oficial. Esto indica que el sistema de predicción implementado es preciso y fiable para calcular el ICA en tiempo real. En cuanto a la parte de predicción, el sistema ha utilizado datos históricos tanto de calidad del aire como de factores meteorológicos (temperatura, humedad, viento, precipitación y nieve) proporcionados por el portal oficial y la API de la AEMET.

Tras la generación del modelo de predicción, los resultados fueron validados comparándolos con el ICA real de ese momento. La validación mostró que los resultados eran precisos y coherentes, confirmando la eficacia del modelo. Una vez validado, el modelo se utilizó para

realizar predicciones basadas en los datos actuales, demostrando su capacidad para anticipar la calidad del aire en función de las condiciones presentes.

Estos resultados corroboran la validez del diseño del sistema de predicción como una solución efectiva para el monitoreo y predicción de la calidad del aire. La capacidad de predecir la calidad del aire con precisión permite una mejor planificación y respuesta a posibles episodios de contaminación, mejorando así la salud y el bienestar de la población. La combinación de datos históricos y actuales ha permitido desarrollar un sistema robusto que puede adaptarse a diferentes condiciones y proporcionar información valiosa en tiempo real.

### 5.3 Sistema de Información

La aplicación móvil desarrollada en Android Studio fue probada para verificar su funcionalidad y usabilidad. Se realizaron pruebas de los tres botones principales: "Información Medidas", "Mostrar Mapa" y "Añadir Medidas", mostrando los resultados en la tabla 3, así como la capacidad de la aplicación para enviar notificaciones al cambiar de eNodoB (simulando esta casuística). Las pruebas mostraron que la aplicación podía:

- Mostrar el ICA de cada contaminante y el índice general correctamente.
- Visualizar en el mapa la ubicación del usuario y los índices de las zonas registradas con precisión.
- Enviar nuevas medidas de contaminantes a la API de manera efectiva.

Tabla 3. Resultados de las pruebas del sistema de información

Funcionalidad	Resultado
Información Medidas	Correcto, sin errores
Mostrar Mapa	Preciso, mapa actualizado
Añadir Medidas	Datos enviados y registrado
Notificaciones	Correctas, según cambios de eNodoB

Los resultados de las pruebas de la aplicación móvil demuestran que el sistema de información es efectivo y fácil de usar. La funcionalidad de cada botón operó según lo esperado y las notificaciones fueron precisas y oportunas. La aplicación cumple con los requisitos del diseño y proporciona una herramienta útil para los usuarios finales.

## **6. Impacto del proyecto**

Para la identificación de los distintos impactos del proyecto se sigue la metodología descrita en [27].

### **Contexto Socioeconómico y Cultural**

El proyecto se desarrolla en un contexto urbano, en la ciudad de Madrid, donde la calidad del aire es una preocupación constante. La implementación del sistema se orienta a mejorar la salud y la calidad de vida de los ciudadanos mediante el acceso a información precisa sobre la calidad del aire. Además, el proyecto se alinea con las políticas municipales y nacionales de sostenibilidad y mejora ambiental.

Los grupos de interés incluyen:

- **Usuarios Finales:** Ciudadanos que utilizarán la aplicación móvil para obtener información sobre la calidad del aire.
- **Autoridades Ambientales:** Organismos gubernamentales responsables de la gestión ambiental y la salud pública.
- **Desarrolladores de Software:** Equipos encargados del desarrollo, mantenimiento y mejora del sistema.
- **Empresas de Transporte:** Operadores de autobuses que colaboran en la instalación de sensores y la recolección de datos.

### **6.1 Identificación de Impactos y Problemáticas**

El proyecto tiene una serie de impactos y problemáticas éticas, sociales y ambientales que se describen a continuación:

#### **Impactos Ambientales**

**Positivos:** Mejora en la gestión de la calidad del aire mediante la recolección y análisis de datos en tiempo real, permitiendo la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas correctivas.

**Negativos:** Consumo de recursos y generación de residuos electrónicos debido a la instalación y mantenimiento de los sensores.

#### **Impactos Sociales**

**Positivos:** Incremento en la conciencia pública sobre la calidad del aire y sus efectos en la salud, empoderando a los ciudadanos con información para tomar decisiones saludables.

**Negativos:** Posible brecha tecnológica entre diferentes segmentos de la población, dificultando el acceso equitativo a la información.

#### **Problemáticas Éticas**

**Privacidad:** Manejo y protección de datos personales y de localización, garantizando que la información recolectada no sea utilizada de manera indebida.

Accesibilidad: Asegurar que la aplicación y los datos sean accesibles para todos los segmentos de la población, incluyendo personas con discapacidades.

### Impacto en la Salud Pública

Descripción: Mejora de la salud pública mediante la reducción de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire, gracias a la información precisa y oportuna proporcionada por el sistema [28].

Grupos Afectados: Ciudadanos en general, especialmente aquellos con condiciones respiratorias preexistentes.

Normativas Relacionadas: Directivas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre calidad del aire y salud.

Posibilidades de Evaluación: Monitoreo de los índices de salud pública antes y después de la implementación del sistema.

### Impacto en la Gestión Ambiental

Descripción: Mejora en la capacidad de las autoridades para gestionar la calidad del aire mediante datos precisos y en tiempo real.

Grupos Afectados: Autoridades locales y organismos de gestión ambiental.

Normativas Relacionadas: Normativas locales y europeas sobre la calidad del aire.

Posibilidades de Evaluación: Análisis de la efectividad de las políticas implementadas basadas en los datos proporcionados por el sistema.

### Impacto Económico

Descripción: Reducción de costos de salud pública y aumento en la eficiencia de las políticas de gestión ambiental.

Grupos Afectados: Gobierno local y nacional, sistema de salud pública.

Normativas Relacionadas: Políticas económicas locales y nacionales relacionadas con la salud pública y el medio ambiente.

Posibilidades de Evaluación: Análisis de los costos de salud pública y comparación con los datos históricos.

El proyecto ha tenido en cuenta los aspectos sociales, ambientales, éticos y legales más relevantes, buscando minimizar los impactos negativos y potenciar los positivos. Durante su desarrollo, se han implementado medidas para proteger la privacidad de los usuarios y garantizar la accesibilidad de la información. Además, se ha alineado con normativas y directrices locales e internacionales para asegurar su coherencia con la ética profesional y la legislación vigente. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad y efectividad del sistema, corroborando su potencial como solución para mejorar la calidad del aire y la salud pública en entornos urbanos.

## 7. Conclusiones

Este trabajo de fin de grado ha abordado el desafío de la monitorización y predicción de la calidad del aire en entornos urbanos, centrándose en la ciudad de Madrid. La calidad del aire es un factor esencial para la salud pública y el bienestar de los ciudadanos, y este proyecto se ha planteado con el objetivo de desarrollar un sistema inteligente capaz de proporcionar datos en tiempo real y predicciones fiables sobre la calidad del aire.

### 7.1 Conclusiones

Tras la realización de este proyecto fin de carrera, se han propuesto mejoras a los tres subsistemas clave: el Sistema de Vigilancia, el Sistema de Predicción y el Sistema de Información. Cada uno de estos subsistemas aborda diferentes aspectos del problema de monitorización y predicción de la calidad del aire en Madrid, ofreciendo una solución integrada y mejorada respecto al sistema vigente. Destacaremos sus funcionalidades, las mejoras implementadas y los resultados obtenidos. Esta sección proporcionará una visión completa del alcance y la efectividad de los sistemas desarrollados, demostrando su contribución a la monitorización ambiental y su potencial para informar y proteger a la población.

#### Sistema de Vigilancia

El Sistema de Vigilancia ha sido desarrollado para recoger datos en tiempo real sobre la calidad del aire mediante sensores móviles instalados en autobuses de la EMT. Este sistema se encarga de la recopilación de datos de contaminantes y la ubicación geográfica, enviando esta información a una API diseñada específicamente para procesar los datos. La simulación se ha realizado localmente utilizando un programa de Python que realiza llamadas periódicas a la API, registrando medidas de calidad del aire y coordenadas simuladas. El sistema ha demostrado ser eficaz en la recolección y gestión de datos en tiempo real.

#### Sistema de Predicción

El Sistema de Predicción ha sido desarrollado utilizando redes neuronales y se basa en datos históricos de calidad del aire y variables meteorológicas (temperatura, humedad, viento, precipitación y nieve). Este sistema genera un modelo predictivo que luego se valida comparando los resultados con el ICA proporcionado por el portal oficial. Una vez validado, el modelo se utiliza para predecir la calidad del aire en tiempo real. Además de predecir el ICA, el sistema también verifica la calidad del aire actual utilizando los datos registrados de los sensores y las mediciones validadas realizadas por los usuarios. Asimismo, atiende las peticiones de los usuarios que se encuentran en su área de cobertura.

A diferencia del sistema actual, donde el procesamiento de la información se realiza en un servidor central, en este trabajo lo llevamos al E-Computing. Esta decisión tiene varias ventajas: mejora la eficiencia del procesamiento al reducir la latencia, aumenta la resiliencia del sistema al descentralizar el procesamiento de datos, y permite una respuesta más rápida a las condiciones locales de calidad del aire. Estas mejoras resultan en un sistema más robusto

y ágil, capaz de proporcionar información más precisa y oportuna para la toma de decisiones informadas sobre la calidad del aire. Los resultados han demostrado que el sistema puede generar predicciones precisas, alineadas con los datos oficiales, lo que valida su efectividad y utilidad.

### Sistema de Información

El Sistema de Información se ha desarrollado como una aplicación móvil en Java utilizando Android Studio. Esta aplicación ofrece tres funcionalidades principales:

- Información de Medidas: Proporciona el índice de calidad del aire de cada contaminante del nodo que provee la información, incluyendo una clasificación general del ICA. Los usuarios pueden actualizar esta información en tiempo real.
- Mostrar Mapa: Muestra la ubicación actual del usuario en un mapa, junto con los índices de calidad del aire de todas las zonas registradas, utilizando un código de colores.
- Añadir Medidas: Permite a los usuarios registrar nuevas medidas de contaminantes mediante un formulario y enviar estos datos a la API para su validación y procesamiento.

## 7.2 Resultados

Los resultados obtenidos durante la fase de pruebas y simulaciones han sido muy prometedores. Esto se verifica ya que, la simulación del sistema de vigilancia dinámica ha demostrado que es posible recoger datos de calidad del aire de forma eficaz utilizando sensores móviles. Aunque la simulación se realizó de forma local y no se pudo probar la conectividad 4G/LTE ni el proceso de establecimiento de contexto de la aplicación MEC, los resultados indican que el sistema puede operar eficientemente en un entorno real. Adicionalmente, el sistema de predicción ha mostrado ser capaz de generar ICAs que se asemejan significativamente a los proporcionados por el portal oficial de calidad del aire. Esto valida la capacidad del modelo para integrar datos históricos y meteorológicos de manera efectiva. La aplicación móvil desarrollada también ha mostrado buenos resultados, permitiendo a los futuros usuarios acceder a información actualizada sobre la calidad del aire, visualizar los datos en un mapa interactivo y contribuir con sus propias mediciones, lo que refuerza la utilidad y la interacción con el sistema propuesto.

### 7.3 Conocimientos derivados

A partir de este trabajo, se han derivado varios conocimientos nuevos y aspectos relevantes del problema:

**Validez del Sistema:** Los resultados obtenidos confirman la validez del sistema propuesto, demostrando que la combinación de sensores móviles y modelos predictivos avanzados puede mejorar significativamente la monitorización y gestión de la calidad del aire en áreas urbanas.

**Nuevas Perspectivas del Problema:** Se ha identificado la necesidad de mejorar la infraestructura de conectividad para asegurar la transmisión continua de datos en tiempo real. Además, se ha resaltado la importancia de integrar datos de diversas fuentes para mejorar la precisión de las predicciones.

**Implicaciones para la Salud Pública:** La capacidad de monitorear y predecir la calidad del aire con mayor precisión puede tener un impacto directo en la salud pública, permitiendo la implementación de medidas preventivas y de mitigación de manera más oportuna.

### 7.1 Trabajos futuros

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se han identificado varias áreas de mejora y expansión que podrían ser abordadas en futuros trabajos. Estas áreas abarcan desde la mejora de la precisión y cobertura del sistema de vigilancia, hasta la optimización de los modelos predictivos y la ampliación de las funcionalidades de la aplicación móvil. Seguidamente, se detallan algunas de las líneas de trabajo más prometedoras:

#### Verificación de la Conectividad y Despliegue de Sensores

Una de las principales limitaciones del proyecto actual ha sido la imposibilidad de probar la conectividad 4G/LTE y el proceso de establecimiento de contexto de la aplicación MEC. Futuros trabajos deberían centrarse en la integración y prueba de estas tecnologías. Además, la expansión del número de sensores móviles y su despliegue en una mayor cantidad de vehículos y rutas urbanas podrían aumentar significativamente la cobertura espacial y la precisión de los datos recolectados.

#### Optimización de los Modelos Predictivos

Aunque el sistema de predicción ha mostrado buenos resultados, existe margen para la optimización de los modelos utilizados. Futuros trabajos podrían explorar el uso de técnicas más avanzadas de machine learning y deep learning, así como la incorporación de nuevas variables meteorológicas y ambientales que puedan influir en la calidad del aire. Además, la implementación de algoritmos de autoaprendizaje permitiría que el modelo se ajuste y mejore continuamente a medida que se recolectan más datos.

### **Ampliación de Funcionalidades de la Aplicación Móvil**

La aplicación móvil ha demostrado ser una herramienta útil para los usuarios, pero existen varias mejoras que podrían implementarse. Entre ellas, se podría incluir la capacidad de recibir notificaciones en tiempo real sobre cambios en la calidad del aire, recomendaciones personalizadas para evitar áreas con alta contaminación, y la integración de datos de salud para alertar a usuarios con condiciones médicas sensibles a la calidad del aire.

### **Evaluación y Expansión Internacional**

Una vez que el sistema esté completamente operativo y probado en un entorno local, futuros trabajos podrían evaluar su aplicabilidad y efectividad en otras ciudades con diferentes características ambientales y urbanas. Esto no solo permitiría validar la generalidad del sistema, sino también adaptarlo a distintas normativas y necesidades específicas de otras regiones. La expansión internacional del sistema podría implicar colaboraciones con instituciones y organismos locales para un despliegue efectivo y eficiente.

### **Integración con Otros Sistemas de Monitoreo Ambiental**

Finalmente, una línea de trabajo futura podría ser la integración de este sistema con otros sistemas de monitoreo ambiental, como la monitorización del ruido, la gestión de residuos, y la calidad del agua. Esta integración permitiría una visión más amplia del estado ambiental de una ciudad y facilitaría la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades y la población.

## 8. Referencias

- [1] Ayuntamiento de Madrid, «Portal de Calidad del aire,» Ayuntamiento de Madrid, 2022. [En línea]. Available: <https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Bases-de-datos-y-publicaciones/Bases-de-datos-de-calidad-del-aire/En-tiempo-real/?vgnnextfmt=default&vgnnextchannel=650a89e859517710VgnVCM1000001d4a900aR CRD>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [2] Ayuntamiento de Madrid, «Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid,» [En línea]. Available: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=41e01e007c9db410VgnVCM2000000c205a0aR CRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aR CRD&vgnnextfmt=default>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [3] Ayuntamiento de Madrid, «App oficial 'Aire Madrid',» [En línea]. Available: <https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Servicios-y-recomendaciones/Servicios-electronicos/App-oficial-Aire-de-Madrid-/?vgnnextfmt=default&vgnnextchannel=6c9e471c5c503710VgnVCM1000008a4a900aR CRD>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [4] B. Varghese, N. Wang, S. Barbhuiya, P. Kilpatrick y D. S. Nikolopoulos, «Challenges and Opportunities in Edge Computing,» IEEE, Nueva York, 2016.
- [5] T. X. Vu, C. Symeon y B. Ottersten, «Edge-Caching Wireless Networks: Performance Analysis and Optimization,» IEEE, 2018.
- [6] F. Giust, G. Verin, K. Antevski, J. Chou, Y. Fang, W. Featherstone, F. Fontes, D. Frydman, A. Li, A. Manzalini, D. Purkayastha, D. Sabella, C. Wehner, K.-W. Wen y Z. Zhou, «MEC Deployments in 4G,» ETSI, Sophia Antipolis CEDEX, France, and Evolution Towards 5G.
- [7] Organización Mundial de la Salud, «Objetivos de desarrollo sostenible,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [8] Ayuntamiento de Madrid, «17 Objetivos De Naciones Unidas para Desarrollo Sostenible. 170 Medidas de la Comunidad de Madrid para el Desarrollo Sostenible,» Madrid, 2018.
- [9] Aeroqual, «Real-time air quality monitoring solutions,» [En línea]. Available: <https://www.aeroqual.com/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [10] Purple Air, «Hyper-Local, Real-Time Air Quality Data For Everyone,» [En línea]. Available: <https://www2.purpleair.com/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [11] IQAir, «Explora la calidad de tu aire,» [En línea]. Available: <https://www.iqair.com/es/>. [Último acceso: Marzo 2024].
- [12] A. Luna, Á. Talavera y L. Cano, «Uso de sensores electroquímicos de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en el distrito de San Isidro - Lima - Perú,» Universidad del Pacífico, Lima, 2017.

- [13] M. L. A. López, «Nuevas estrategias para sensores ópticos de dióxido de carbono gas,» Universidad de Granada, Granada, 2014.
- [14] C. Longbottom, «How to implement edge computing in 5 steps,» TechTarget, 2021.
- [15] J. Yao, T. Han y N. Ansari, «On Mobile Edge Caching,» IEEE, 2019.
- [16] ETSI, «Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture,» ETSI, Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2022.
- [17] ETSI, «Multi-access Edge Computing (MEC); UE application interface,» ETSI, Sophia Antipolis Cedex - FRANCE, 2019.
- [18] J. Torres, «Redes Neuronales Recurrentes,» 22 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://torres.ai/redes-neuronales-recurrentes/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [19] X. Li, L. Peng, X. Yao, S. Cui, Y. Hu, C. You y T. Chi, «Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: Method development and evaluation,» Elsevier, Beijing, 2017.
- [20] «ANEXO. Metodología actualizada para el cálculo del Índice de la Calidad del Aire,» de *Boletín Oficial del Estado*, Madrid, 2020, p. Sec. I. 75835.
- [21] A. R. Whitehill, M. Lunden, B. LaFranchi, S. Kaushik y P. A. Solomon, «Mobile Air Quality Monitoring and Comparison to Fixed Monitoring Sites for Quality Assurance,» Atmospheric Measurement Techniques, Carolina del Norte, 2023.
- [22] Teldat, «Router embarcado para vehículos H2-Automotive+,» Teldat, Madrid, 2017.
- [23] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, «AEMET OpenData,» [En línea]. Available: <https://opendata.aemet.es/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [24] Keras, «LSTM layer,» Keras 3, 2024. [En línea]. Available: [https://keras.io/api/layers/recurrent\\_layers/lstm/](https://keras.io/api/layers/recurrent_layers/lstm/). [Último acceso: Abril 2024].
- [25] S. R. Montañó, «FastAPI,» FastAPI, 2018. [En línea]. Available: <https://fastapi.tiangolo.com/>. [Último acceso: Abril 2024].
- [26] Google, «Android Developers,» Android Studio, 2013. [En línea]. Available: <https://developer.android.com/>. [Último acceso: Mayo 2024].
- [27] C. F. Aller y R. Miñano, «Guía para trabajar la Responsabilidad Social y Ambiental (GRSA),» ETSISistemas Infromáticos. UPM, Madrid, 2015.
- [28] M. E. Estebana, M. Bote-González, C. Alejandrec, M. Balaguerc y I. Jordan, «Influencia de los factores meteorológicos y contaminantes del aire en casos de bronquiolitis grave en el área metropolitana de Barcelona: estudio piloto,» Asociación Española de Pediatría, Barcelona, 2020.

## Anexo

### A.1 Presupuestos

#### A.1.1. Mediciones, Unidades y Precios

Tabla 4. Presupuestos, mediciones, unidades y precios

Servicio/Producto	Unidad	Precio Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
Sensores de calidad del aire	Unidad	150	10	1500
Dispositivos móviles	Unidad	300	5	1500
Servidor de Edge Computing	Unidad	2000	1	2000
Desarrollo de software	Hora	50	200	10000
Licencias de software	Unidad	500	5	2500
Gastos de instalación	Proyecto	1000	1	1000
Mantenimiento anual	Año	2000	1	2000

#### A.1.2. Presupuestos Parciales

Tabla 5. Presupuestos parciales de Hardware

Producto/Servicio	Unidad	Precio Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
Sensores de calidad del aire	Unidad	150	10	1500
Dispositivos móviles	Unidad	300	5	1500
Servidor de Edge Computing	Unidad	2000	1	2000
<b>Total</b>				<b>5000</b>

Tabla 6. Presupuestos parciales de Desarrollo Software

Producto/Servicio	Unidad	Precio Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
Desarrollo de software	Hora	50	200	10000
Licencias de software	Unidad	500	5	2500
<b>Total</b>				<b>12500</b>

Tabla 7. Presupuestos Parciales de Puesta en Marcha y Mantenimiento

Producto/Servicio	Unidad	Precio Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
Gastos de instalación	Proyecto	1000	1	1000
Mantenimiento anual	Año	2000	1	2000
<b>Total</b>				<b>3000</b>

**A.1.3. Presupuesto General**

Tabla 8. Tabla de presupuestos general

Concepto	Total (€)
Presupuesto Parcial de Hardware	5000
Presupuesto Parcial de Desarrollo	12500
Presupuesto Parcial de Instalación	3000
<b>Total General</b>	<b>20500</b>

## A.2 Manuales de Usuario

### A.2.1. Simulador del Sistema de Vigilancia

El Simulador del Sistema de Vigilancia se compone de dos programas que deben ejecutarse de manera secuencial para simular una estación móvil de monitoreo de calidad del aire. A continuación, se describen los pasos para su correcta utilización:

1. Ejecución del Programa "SistemaDeVigilancia":

Este programa debe ser ejecutado primero. Una vez iniciado, se generará automáticamente un archivo JSON con el nombre "vigilancia\_parseo\_YYYYMMdd.json", donde YYYY representa el año, MM el mes y dd el día actuales. Este archivo contendrá las medidas actuales de las estaciones fijas del sistema de vigilancia existente.

2. Preparación y Ejecución del Programa "SimuladorSistemaDeVigilancia":

Antes de ejecutar este programa, es necesaria una configuración previa. Deben proporcionarse dos archivos de entrada:

- Un archivo con las coordenadas de la ruta que se desea simular.
- El archivo JSON generado por el programa "SistemaDeVigilancia".

Con estos archivos configurados, el programa podrá simular una estación móvil de monitoreo.

Para el correcto funcionamiento de la simulación del Sistema de Vigilancia, es fundamental que la aplicación MEC esté en funcionamiento y a la espera de recibir peticiones. Esto asegura que los datos simulados se procesen adecuadamente y que el sistema de vigilancia opere de manera efectiva.

### A.2.2. Aplicación MEC

Para el correcto funcionamiento de la aplicación MEC, es necesario configurar los siguientes parámetros iniciales:

- ruta\_input: Ruta definida para los ficheros de entrada.
- ruta\_output: Ruta definida para los ficheros de salida.
- nombre\_excel\_local: Nombre del Excel de registros locales.
- nombre\_json\_local: Nombre del fichero JSON que contendrá los ICAs procesados de este nodo.
- nombre\_excel\_total: Nombre del Excel de registros totales.
- nombre\_json\_total: Nombre del fichero JSON que contendrá los ICAs procesados de todos los nodos.
- nombre\_excel\_indice: Nombre del fichero que contiene la clasificación de los ICAs.
- sec\_procesamiento\_periodico: Tiempo de la tarea periódica para el procesamiento interno de los ICAs.

Otro requisito necesario es que en la ruta de entrada "Input" se incluya el fichero de clasificación de los ICAs, que contiene dicha clasificación y más información relevante.

Para poner en marcha la aplicación MEC, se debe ejecutar el siguiente comando:

- `uvicorn main:app --host localhost --port 8000 --reload`

Tras ejecutar este comando, deberían aparecer logs indicando el correcto lanzamiento, y la API estará preparada para recibir peticiones.

### **A.2.3. Aplicación Móvil icaMad**

Para usar la aplicación móvil icaMad, primero, el usuario debe descargar e instalar la aplicación desde los canales correspondientes. Al abrir la aplicación, el usuario se encontrará con la pantalla principal, que muestra el logo de la aplicación, el nombre "icaMad", y tres botones: "Información medidas", "Mostrar Mapa" y "Añadir Medida". Al seleccionar "Información medidas", se accede a una pantalla con datos detallados de la calidad del aire en su ubicación actual. El botón "Mostrar Mapa" dirige a una pantalla donde se visualiza un mapa de la ciudad con indicadores de calidad del aire en diferentes zonas. Al presionar "Añadir Medida", el usuario puede introducir sus propias mediciones utilizando un formulario y enviar esta información para contribuir a la base de datos del sistema. La aplicación también proporciona notificaciones en tiempo real sobre cambios en el índice de calidad del aire, asegurando que los usuarios estén siempre informados sobre las condiciones actuales.