

Proyecto NanoSen-AQM: Desarrollo y validación en campo de un sistema de nanosensores de bajo consumo y bajo coste para la monitorización en tiempo real de la calidad del aire ambiente

J. Lozano(1,*), E. Hontañón(2), L. Presmanes(3), J.P. Santos(2), R. Sánchez(4), B. Ribeiro(5), E. Pinilla(1), O. Barrachina(6)

(1) Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Badajoz, España (2) Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España (3) Centre National de la Recherche Scientifique, Toulouse, France (4) Ray Ingeniería Electrónica SL; Mirabel, España (5) Facultad de ciencias y tecnología, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal; (6) AIGUASOL, Barcelona, España

(*) jesuslozano@unex.es

Palabras clave: sensores de gas, nanosensores, sistema multisensor, calidad del aire

Resumen

Este trabajo presenta el proyecto NanoSen-AQM (Programa Interreg-Sudoe de la UE, Ref. SOE2 / P1 / S0569). que tiene como objetivo desarrollar y validar un sistema electrónico en tiempo real utilizando sensores de gas basados en nanomateriales de alto rendimiento (nanosensores) para medir los contaminantes en el aire, y un sistema en la nube para almacenar, procesar y explotar los datos de los sensores. El sistema multisensor se instalará a bordo de plataformas convencionales de monitorización de la calidad del aire (AQM) (fijas y móviles), así como en otras como drones, bicicletas de carga y dispositivos personales. Las mediciones de la contaminación del aire se llevarán a cabo en diferentes entornos (natural, rural, industrial y urbano) en varias ubicaciones de España (Extremadura, Ávila y Barcelona) y Portugal (Évora, Sines y Lisboa) mediante el uso de los sistemas desarrollados y otros de referencia para calibrar y evaluar el rendimiento en campo de los sensores y sistemas desarrollados.

1. Introducción

Hasta la fecha, la gran mayoría de la información sobre la calidad del aire de dominio público se deriva de profesionales capacitados que siguen métodos de medición aceptados [1]. La barrera sustancial de costos debido al gasto de la compra inicial de instrumentación y los considerables costos de operación en curso, incluyendo el servicio, procesamiento de datos y calibración, junto con la complejidad técnica de permitir tales mediciones, ha limitado un uso más amplio de la tecnología. Por otra parte, la miniaturización electrónica ha llevado a un crecimiento en la prominencia de los llamados "sensores de bajo costo" (LCS). La aparición de estos dispositivos reduce enormemente la barrera de costos para realizar mediciones de contaminación del aire, crea nuevas aplicaciones atmosféricas, ofrece nuevos servicios atmosféricos y admite la inclusión de nuevos usuarios que pueden poner las mediciones en manos de personas y comunidades que, a su vez, pueden asumir una mayor responsabilidad sobre cuestiones relacionadas con la calidad del aire local o el cambio climático [2].

La literatura científica actual muestra que deben realizarse correcciones cuando los LCS se utilicen en lugar de los métodos de referencia existentes [3, 4]. Los dispositivos más pequeños y / o de más bajo coste tienden a ser menos sensibles, menos precisos y menos específicos para los compuestos a detectar. LCS pueden informar de los valores de medición de manera diferente que los enfoques de referencia y la conversión a unidades físicamente significativas no suele ser sencilla [5]. La aparición de LCS con incertidumbres menos caracterizadas y que no encajan fácilmente dentro de los marcos técnicos existentes para la calidad o calibración de datos crea importantes desafíos de cuantificación. Sin embargo, a pesar de sus limitaciones actuales, los LCS representan una herramienta plausible para ampliar la investigación y la capacidad operativa más allá de los profesionales y enfoques tradicionales.

2. Objetivos y productos principales

El proyecto aborda el reto de la monitorización de la calidad del aire y la información al público en tiempo real de forma escalable (masiva), distribuida, ubicua (en cualquier parte) y sostenible (bajo consumo y bajo coste). En el proyecto se desarrollarán sensores de última generación (nanosensores) para la detección de gases contaminantes (NO₂, O₃, CO). Los sensores y la electrónica asociada (operación, control y calibración) se integrarán en plataformas estacionarias y móviles y se desarrollará un sistema en la nube para gestionar los datos de calidad del aire. Las plataformas y el sistema en la nube se utilizarán para medir la contaminación del aire en zonas urbanas y rurales (uno o varios puntos) e informar de la calidad del aire a la población afectada. Se prestará especial atención a la calibración y la estabilidad de los sensores, la incertidumbre de las medidas y la reproducibilidad de los resultados.

Los sensores de gases consistirán en capas nanoestructuradas de ferritas espinelas (XFe₂O₄, X=Zn, Ni, Cu...) u óxidos metálicos semiconductores (MOS=SnO₂, ZnO...) crecidas o depositadas sobre sustratos micromecanizados (litografía, CVD, ADL, electrohilado y centrifugado). Los materiales sensibles se doparán con materiales funcionales (NP Au, Pd, ITO o grafeno) para mejorar la sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta y temperatura de operación de los sensores. Se considerarán estrategias para optimizar la selectividad de los sensores tales como multi-sensores y modulación de temperatura. El circuito electrónico, el procedimiento de medida y la comunicación inalámbrica se diseñarán para minimizar el consumo de energía.

El sistema en la nube presenta aspectos innovadores en el protocolo de comunicación (RESTful API), arquitectura y software de gestión de datos. Para el pre-procesamiento de las señales (normalización, filtrado y manejo de valores atípicos) se utilizarán máquinas de vectores de soporte, ajuste de mínimos cuadrados y mapas auto-organizados (2D o 3D, lineales o no lineales) y para el procesamiento de los datos se usarán técnicas de inteligencia artificial, reconocimiento de patrones y computación en la nube.

Para predecir la evolución temporal de la calidad del aire y la dispersión de contaminantes en la atmósfera se emplearán métodos de aprendizaje de máquina basados en redes neuronales, incluyendo aprendizaje profundo adaptado a señales continuas, y modelos auto-regresivos de media móvil (ARX, ARMAX) todos ellos adaptados a las características específicas de los sensores de gases.

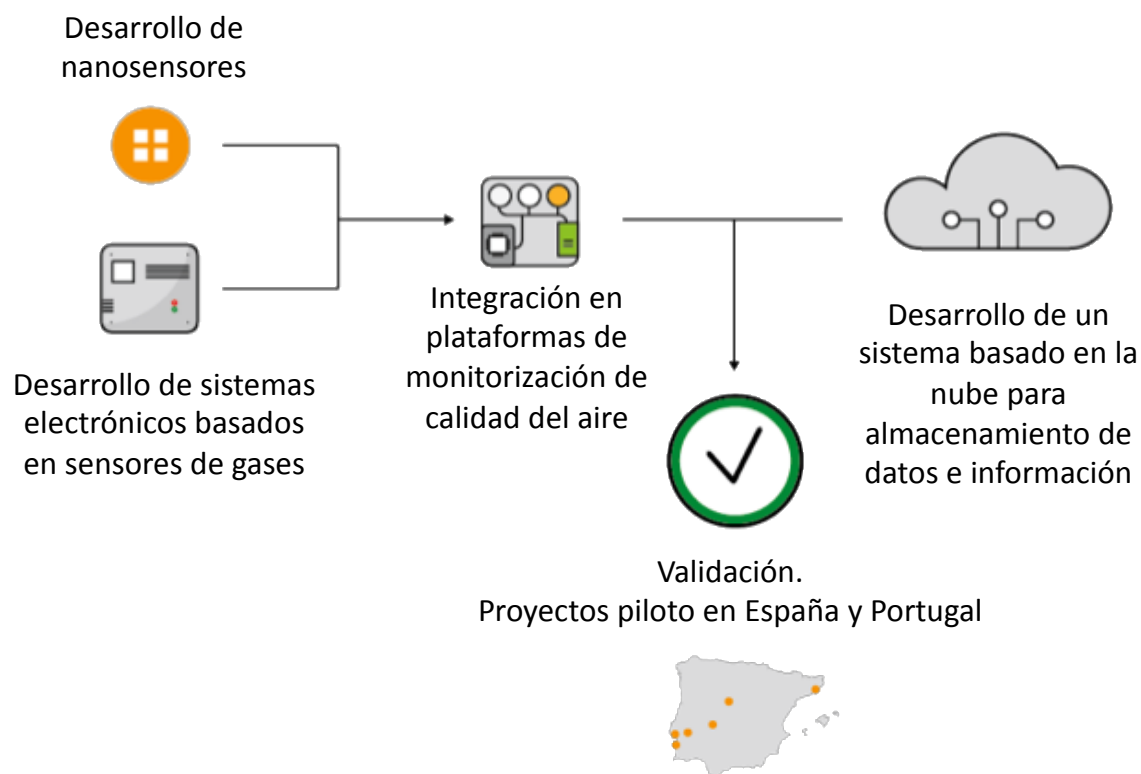


Figura 1. Esquema resumen del proyecto NanoSen-AQM

Un aspecto novedoso es el uso de drones para medir la contaminación del aire en lugares remotos, de difícil acceso o de riesgo. Se incorporará un brazo robótico al dron para capturar y transportar el módulo con los sensores y colocarlo en el lugar de interés y se aplicarán técnicas de visión artificial para identificar el módulo a distancia. Además, se integrará el sistema de sensores en el dron y se realizarán medidas a distintas alturas.

El sistema objeto de este proyecto aporta las siguientes soluciones/mejoras en el ámbito de la gestión de la calidad del aire ambiente en el espacio Sudoeste: 1) Medición autónoma, en tiempo real y continuada en el tiempo de la contaminación del aire, de bajo consumo y bajo coste; 2) Monitorización masiva, distribuida y ubicua de la calidad del aire ambiente, incluso en zonas remotas o de difícil acceso; 3) Datos en tiempo real de contaminación del aire de resolución espacial y temporal óptima para la validación de los modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera y para la evaluación de la exposición individual a la contaminación atmosférica; 4) Capacidad de predicción de la evolución espacial y temporal de la calidad del aire; 5) Participación de los ciudadanos en la gestión de la calidad del aire y, por tanto, también en la protección de la población y el ecosistema de su entorno.

El objetivo principal del proyecto es por lo tanto, Desarrollar un sistema electrónico de tiempo real de bajo consumo y bajo coste para la monitorización masiva, distribuida y ubicua de la calidad del aire.

Los productos principales generados durante la ejecución del proyecto son:

- PROTOTIPOS de sistemas multisensores para la medición en tiempo real de contaminantes en el aire

- PLATAFORMA en la nube como servicio para la monitorización de la calidad del aire
- PROTOTIPOS de nanosensores de gases

3. Partenariado

El proyecto será ejecutado por un total de 11 socios entre Centros de investigación, universidades, administraciones publicas y empresas. A continuación se muestra el partenariado del proyecto NanoSen-AQM:

1. Consejo Superior de Investigaciones Científicas
2. Universidad de Extremadura
3. Junta de Extremadura – Consejería de Medio Ambiente y Rural, Políticas Agrarias y Territorio
4. Diputación de Ávila
5. Àrea Metropolitana de Barcelona AMB
6. Sistemes Avançats d'Energia Solar Tèrmica SCCL AIGUASOL
7. Universidade de Évora
8. Universidade de Coimbra FCTUC Portugal PT16
9. Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS-CIRIMAT
10. Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS-LAAS France FRJ2
11. Ray Ingeniería Electrónica, S.L.



Figura 2. Participantes en el proyecto NanoSen-AQM

4. Planificación del proyecto: grupos de tareas

La planificación del proyecto se ha realizado en grupos de tareas específicos (GT) y transversales (GT.T). A continuación se describen brevemente las actividades del proyecto.

GT.0. Preparación del Proyecto. El CSIC ha coordinado la elaboración del dossier de candidatura de la 1ª fase y la 2ª fase de la convocatoria. Todos los beneficiarios han contribuido al dossier de candidatura aportando la información necesaria para cumplimentar el formulario de candidatura y los documentos requeridos por el Programa.

GT.1. Especificaciones del sistema electrónico de monitorización de la calidad del aire y de los escenarios de campo para la validación del sistema. Se van a elaborar especificaciones técnicas de los sensores, del sistema electrónico para la detección de contaminantes en el aire y del sistema en la nube para la gestión de los datos de contaminación atmosférica. Se van a definir escenarios de campo para la validación del sistema integral formado por los dos sistemas anteriores. Se identificarán localizaciones en Extremadura, Ávila, el área metropolitana de Barcelona y Portugal y se definirán las

- A.2.3 Caracterización de los nanosensores para la detección de gases
- A.2.4 Fabricación de los nanosensores de gases
- A.2.5 Selección de los sensores comerciales

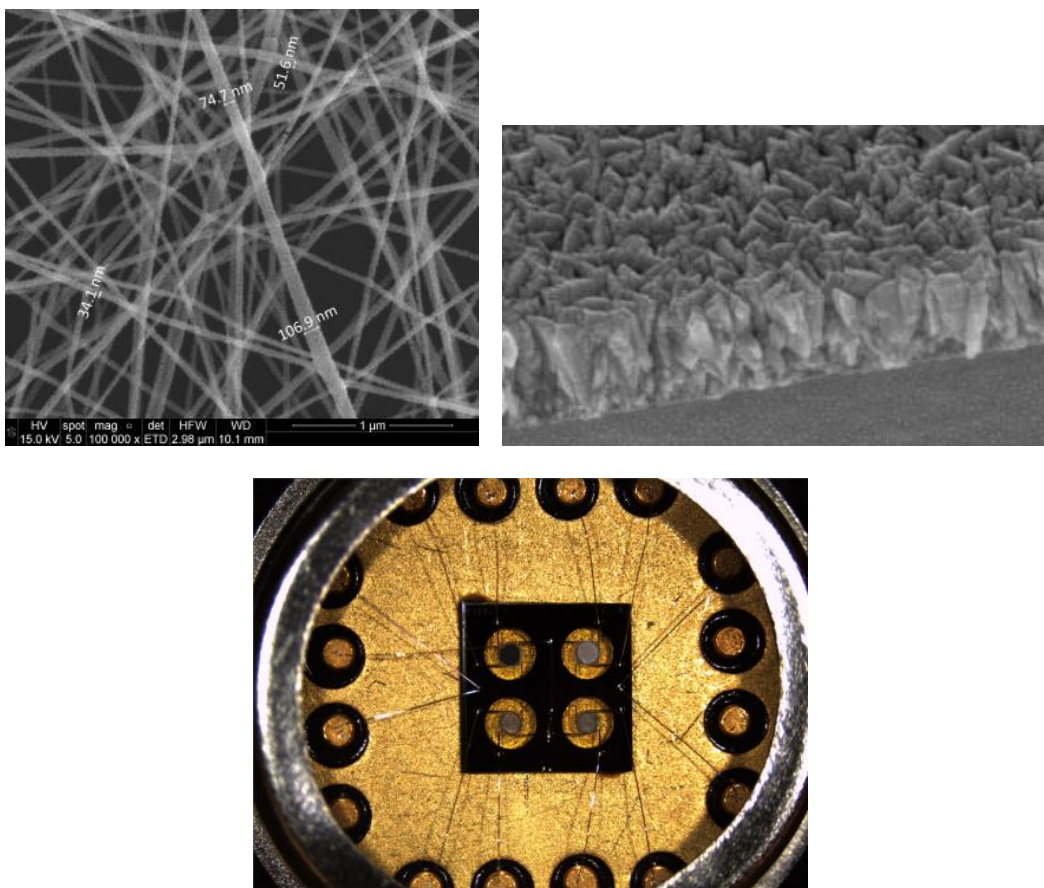


Figura 4. Materiales sensibles y sensores del proyecto NanoSen-AQM

GT.3. Desarrollo y fabricación de un sistema electrónico basado en sensores para la medición de la contaminación del aire. Teniendo en cuenta los escenarios para la validación de los sensores (A.1.1) y los sensores desarrollados en el proyecto y comerciales (GT.2), se diseñará y desarrollará un sistema electrónico altamente modular, cuyos módulos se adaptarán permitiendo la integración del sistema en plataformas estacionarias, plataformas móviles, bicicletas de reparto, drones y dispositivos personales para la medición de la contaminación del aire. Se definirá la arquitectura de control del sistema electrónico para cada una de las plataformas. Se realizarán pruebas de funcionamiento de los sistemas electrónicos, se conectarán a la plataforma de gestión de datos en la nube y se calibrarán los sensores. Se fabricarán prototipos del sistema electrónico para las diferentes plataformas. Las actividades de este GT son las siguientes:

- A.3.1 Definición de la arquitectura de control
- A.3.2 Diseño y desarrollo del sistema de captación y almacenamiento de energía y de control de la batería
- A.3.3 Diseño y desarrollo del sistema de muestreo del aire

- A.3.4 Diseño y fabricación de los circuitos para el acondicionamiento de los sensores
- A.3.5 Diseño y fabricación del sistema de instrumentación y control
- A.3.6 Diseño y desarrollo del sistema de comunicación y almacenamiento local de datos
- A.3.7 Fabricación de los sistemas electrónicos y validación en el laboratorio

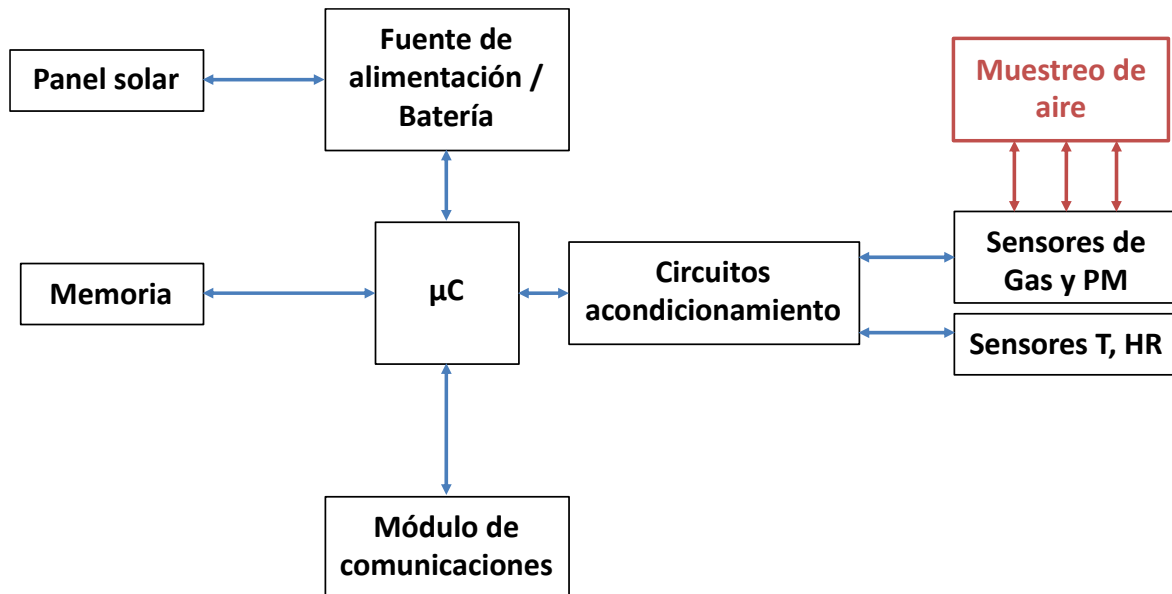


Figura 5. Diagrama de bloques de los dispositivos electrónicos a desarrollar en el proyecto NanoSen-AQM

GT.4. Integración del sistema electrónico en las plataformas de monitorización de la calidad del aire. Los beneficiarios que forman parte de administraciones públicas pondrán a disposición del proyecto estaciones fijas, unidades móviles y bicicletas de carga, mientras que los desarrolladores de los drones y dispositivos personales para la realización de medidas mediante diferentes sistemas electrónicos que junto con el sistema en la nube y los paneles informativos instruirán y capacitarán a los operadores de las plataformas para:

- Instalar los prototipos de los sistemas electrónicos.
- Sincronizar e integrar las señales del sistema electrónico, los instrumentos de medida y otros sensores y equipos de los que disponen las plataformas.
- Conectar las plataformas y los paneles al sistema de computación en la nube.
- Verificar el funcionamiento de las plataformas con los sistemas electrónicos integrados y de los paneles informativos, ambos conectados al sistema en la nube.

Las actividades de este GT son las siguientes:

- A.4.1 Integración del sistema electrónico en las plataformas fijas
- A.4.2 Integración del sistema electrónico en las plataformas móviles
- A.4.3 Integración del sistema electrónico en las bicicletas de reparto
- A.4.4 Integración del sistema electrónico en los drones
- A.4.5 Integración del sistema electrónico en los dispositivos de medida personales

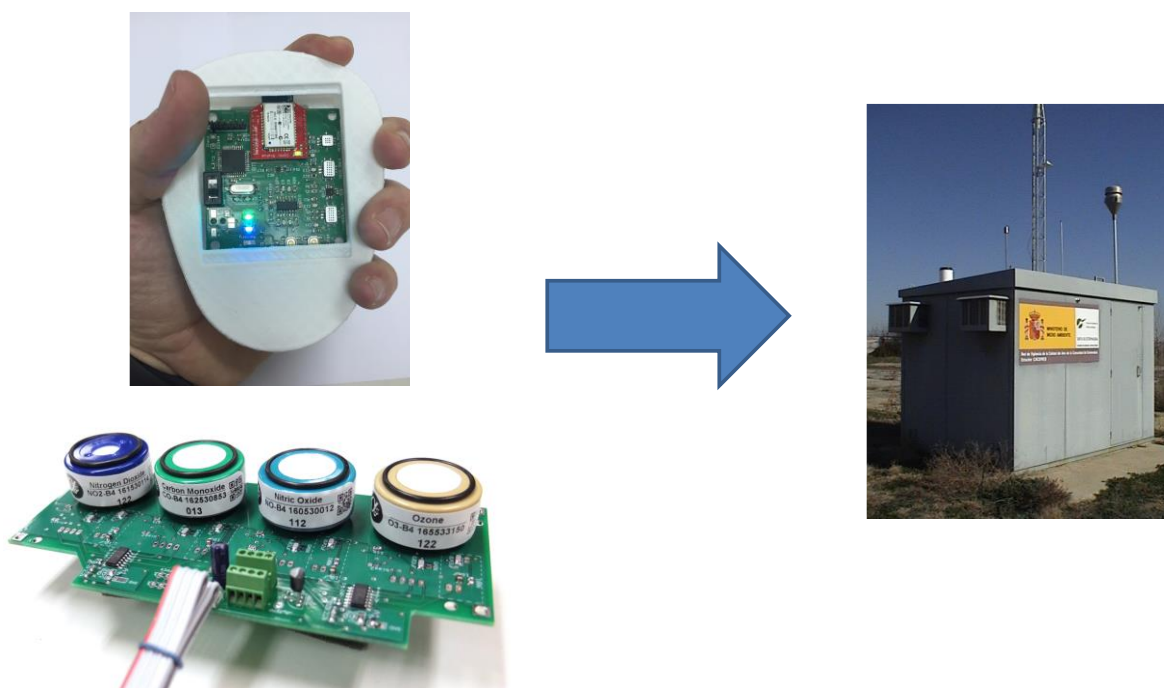


Figura 6. Integración de dispositivos en plataformas AQM

GT.5. Desarrollo de un sistema en la nube de gestión de los datos de calidad del aire e información al público. Desarrollo del sistema en la nube: Diseñar arquitectura del sistema en la nube, software control, software explotación y presentación de datos, software e interfaces de la nube con operador y usuarios. Implementar sistema en la nube y programar software. Conectar sistema en la nube con plataformas y verificar sistema integral con aire ambiente.

Las actividades de este GT son las siguientes:

- A.5.1 Diseño, desarrollo e implementación de los servicios centrales del sistema en la nube
- A.5.2 Desarrollo y validación de los algoritmos de calibración en tiempo real de los sensores
- A.5.3 Desarrollo y validación de los modelos de procesado de los datos de calidad del aire basados en aprendizaje automático
- A.5.4 Desarrollo de las aplicaciones cliente

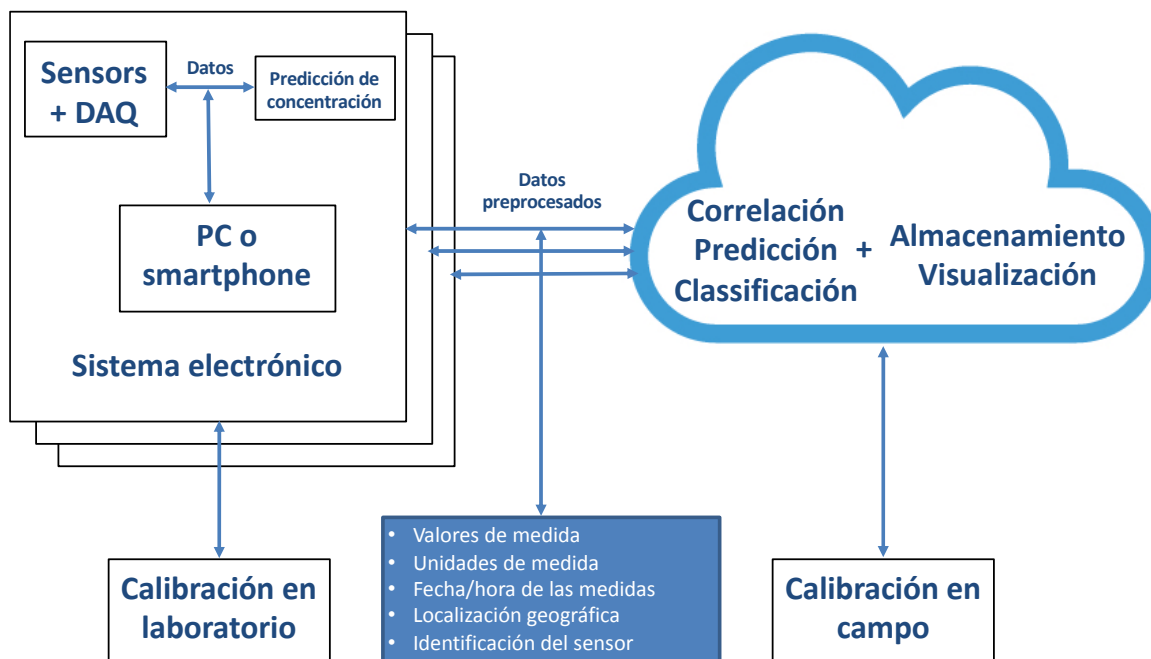


Figura 7. Esquema de procesado de datos del proyecto NanoSen-AQM

GT.6. Validación en campo del sistema integral - sistema electrónico y sistema en la nube - para la monitorización de la calidad del aire. Se realizarán campañas de medida de contaminantes en el aire con los nanosensores de gases, sensores comerciales y analizadores certificados. También se realizarán campañas de información y sensibilización sobre calidad del aire mediante paneles y aplicaciones móviles, y se elaborará un estudio de costes de sistemas multisensores para la medición de la contaminación atmosférica. El estudio anterior servirá como base para la realización de estudios de viabilidad de redes de sensores para lograr objetivos específicos de calidad del aire y de investigación en cambio climático.

Las actividades de este GT son las siguientes:

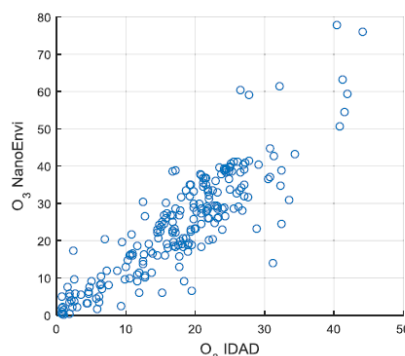
- A.6.1 Campañas de monitorización de la calidad del aire
- A.6.2 Evaluación de los resultados de las campañas de medida y validación de los sistemas multisensores
- A.6.3 Evaluación y optimización de costes de los sistemas multisensores para la medición de la contaminación del aire
- A.6.4 Estudio de viabilidad de las redes de sensores para la vigilancia de la calidad del aire y la investigación climática
- A.6.5 Campaña de información y sensibilización sobre calidad del aire mediante paneles
- A.6.6 Campañas de información y sensibilización sobre calidad del aire mediante aplicaciones móviles



Instrumentos de referencia



NanoSen-AQM



Sensores y equipos comerciales

Figura 8. Esquema de la validación de dispositivos en el proyecto NanoSen-AQM

Los paquetes de trabajo transversales son los siguientes:

GT.T1. Gestión del Proyecto. Esta tarea está dirigida por el grupo coordinador del proyecto (CSIC) Las actividades son las siguientes:

- A.T1.1 Estructuras, responsabilidades y procedimientos para la gestión administrativa y la coordinación diaria del proyecto.
- A.T1.2 Órganos para la toma de decisiones políticas y técnicas del proyecto y sus competencias
- A.T1.3 Sistema de comunicación interna en el seno del partenariado
- A.T1.4 Organización interna prevista para la elaboración de informes de ejecución
- A.T1.5 Gestión financiera del proyecto

GT.T2. Comunicación del proyecto. Se realizan actividades relacionadas con la difusión de los resultados del proyecto. Las actividades son las siguientes:

- A.T2.1 Creación del logotipo
- A.T2.2 Página web
- A.T2.3 Evento de difusión de resultados (Workshop 3)
- A.T2.4 Cartel con información sobre el proyecto (de un tamaño mínimo A3), de acuerdo con el reglamento (UE) No 1303/2013 de 17 de diciembre de 2013
- A.T2.5 Plan de Comunicación

GT.T3. Seguimiento y evaluación del proyecto. Se realiza un seguimiento de la ejecución del proyecto y se evalúan los resultados obtenidos. Las actividades a realizar en este GT son las siguientes:

- A.T3.1 Estructura, responsabilidades y procedimiento para el seguimiento del proyecto

A.T3.2 Estructura, responsabilidades y procedimiento para la evaluación del proyecto

A.T3.3 Procedimientos previstos para la gestión de los riesgos y el control de la calidad.

5. Próximos eventos de difusión del proyecto.

Se realizarán diferentes workshops para la difusión de los resultados del proyecto:

Workshop 1: a celebrar en abril de 2019 en Toulouse, FR y organizado por el CNRS.

Workshop 2: a celebrar en abril de 2020 en Avila, ES y organizado por la Diputación de Ávila

Escuela de Otoño: a celebrar en octubre de 2020 en Badajoz, ES y organizado por la Universidad de Extremadura en colaboración con la Junta de Extremadura y el CSIC.

Workshop 3 (final): a celebrar en febrero de 2021 en Barcelona, ES y organizado por AMB.

Se publicará periódicamente información sobre eventos y resultados en la página web del proyecto: <https://www.nanosenaqm.eu> y en redes sociales: @NanoSenAQM

6. Conclusiones

Se ha presentado el proyecto NanoSen-AQM (Programa Interreg-Sudoe de la UE, Ref. SOE2 / P1 / S0569). que tiene como objetivo desarrollar y validar un sistema electrónico en tiempo real utilizando sensores de gas basados en nanomateriales de alto rendimiento (nanosensores) para medir los contaminantes en el aire, y un sistema en la nube para almacenar, procesar y explotar los datos de los sensores. Se han descrito los principales objetivos así como la planificación y las diferentes actividades y eventos a realizar.

7. Referencias

1. Maré, M., Tobiszewski, M., Zabiegała, B., de la Guardia, M., & Namieśnik, J. (2015). Current air quality analytics and monitoring: A review. *Analytica Chimica Acta*, 853, 116-126.
2. Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., ... & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment international*, 75, 199-205.
3. Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2015). Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 215, 249-257.
4. Spinelle, L., Gerboles, M., Villani, M. G., Aleixandre, M., & Bonavitacola, F. (2017). Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO2. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238, 706-715.
5. Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., ... & Esposito, E. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 147, 246-263.