

Capítulo 7

Sistema de análisis de datos abiertos para evaluar la calidad del aire y el clima en Sectores rurales del Cesar

*Lizeth Badillo Duran, Luis Manuel Palmera Quintero,
Karen Cristina Coronel Robles, Didier Fernando Guerrero Sumalave*

Badillo Duran, L., Palmera Quintero, L. M., Coronel Robles, K. C., & Guerrero Sumalave, D. F. (2026). Sistema de análisis de datos abiertos para evaluar la calidad del aire y el clima en Sectores rurales del Cesar. En F. J. Manjarres Arias. (Coord). *El espectro de las ingenierías. Investigaciones situadas en contextos regionales (Volumen I)*. (pp. 137-150). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.401.c866>



07

Sistema de análisis de datos abiertos para evaluar la calidad del aire y el clima en Sectores rurales del Cesar

Resumen

La contaminación atmosférica es un problema prioritario de salud pública en Colombia y se agrava en municipios que carecen de estaciones de monitoreo, como Aguachica, Cesar. Este estudio presenta el diseño e implementación de un sistema de análisis de datos abiertos para evaluar la calidad del aire y el clima en Aguachica. El sistema integra datos de contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO) y variables meteorológicas de fuentes oficiales y públicas, los procesa mediante métodos cuantitativos y los visualiza mediante mapas, tableros interactivos y reportes descargables. La metodología combina investigación aplicada con enfoque cuantitativo y una adaptación de Extreme Programming para estructurar las fases de planificación, diseño, desarrollo y pruebas. Los resultados del periodo analizado muestran predominio de categorías de calidad del aire “buena” y ausencia de anomalías recientes, evidenciando el potencial de la herramienta para generar indicadores locales en territorios sin monitoreo continuo. El sistema se perfila como insumo para estrategias de vigilancia ambiental, educación y formulación de políticas públicas con enfoque territorial en Aguachica.

Palabras claves: Aire; Calidad del aire; Contaminación atmosférica; Cambio climático; Salud pública

Introducción

La contaminación atmosférica se ha consolidado como uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública en Colombia, con impactos directos en la calidad de vida, la productividad económica y la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016), el 92 % de la población mundial reside en zonas donde los niveles de contaminantes superan los límites seguros, y anualmente se registran alrededor de 3 millones de muertes prematuras atribuibles a la exposición prolongada a aire contaminado, especialmente en países de ingresos bajos y medios. En este contexto, Colombia no es la excepción: el Departamento Nacional de Planeación (2018), estimó que en 2015 se registraron 8.052 muertes asociadas a la mala calidad del aire, con costos económicos cercanos a los 12,2 billones de pesos, equivalentes al 1,5 % del PIB nacional. Estas cifras subrayan la urgencia de fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental y la toma de decisiones basadas en evidencia científica.

El principal contaminante atmosférico en el país es el material particulado fino ($PM_{2,5}$ y PM_{10}), cuyas concentraciones superan frecuentemente los umbrales establecidos por la OMS en ciudades como Bogotá, Medellín y Cali. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018), señala que aproximadamente el 80 % de las emisiones de $PM_{2,5}$ provienen de fuentes móviles, mientras que el 20 % restante se origina en actividades industriales y quema de biomasa. De acuerdo con el IDEAM, MinAmbiente y la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC, 2019), en 2014 Colombia emitió cerca de 242.000 toneladas de $PM_{2,5}$, de las cuales el 25 % corresponden a fuentes urbanas.

Sin embargo, en municipios como Aguachica, Cesar, la situación es crítica no solo por la posible exposición a contaminantes, sino por la falta de infraestructura de monitoreo ambiental. La ausencia de estaciones oficiales de medición de calidad del aire impide generar diagnósticos precisos, evaluar tendencias históricas o implementar políticas públicas efectivas adaptadas al contexto local. Esta brecha de información limita la capacidad de respuesta institucional frente

140
CAPÍTULO 7

a episodios de contaminación o fenómenos climáticos extremos, que se han intensificado en los últimos años debido al cambio climático (Vélez, 2019; Banco Mundial, 2023).

Ante este panorama, se hace indispensable el desarrollo de sistemas de análisis de datos abiertos que, mediante el uso de fuentes alternativas como sensores remotos, modelos satelitales, estaciones móviles y datos meteorológicos públicos, permiten reconstruir indicadores de calidad del aire y variables climáticas en tiempo real o retrospectivo. Estas herramientas no solo democratizan el acceso a la información ambiental, sino que también empoderan a la comunidad, a las autoridades locales y al sector académico para intervenir de manera proactiva en la protección de la salud pública y la gestión del territorio.

Por ello, este proyecto propone el diseño e implementación de un sistema de análisis de datos abiertos para evaluar la calidad del aire y el clima en Aguachica, Cesar, integrando técnicas de procesamiento de datos, visualización interactiva y, potencialmente, modelos predictivos basados en inteligencia artificial. La iniciativa busca no solo suplir la carencia de mediciones directas, sino también sentar las bases para un observatorio ambiental local que apoye la investigación, la educación y la formulación de políticas públicas con enfoque territorial.

Tipo de investigación

La investigación aplicada tiene como objetivo resolver problemas concretos mediante la utilización del conocimiento científico, orientándose a mejorar situaciones reales a través de soluciones prácticas. En este proyecto, ese propósito se materializa en un sistema de datos abiertos para evaluar la calidad del aire y el clima en Aguachica, generando líneas base, tableros y alertas que apoyen decisiones públicas. Para ello, se emplean métodos cuantitativos para la recopilación y análisis de datos ambientales procedentes de fuentes oficiales y abiertas (IDEAM, 2022; MinAmbiente, 2022). La investigación aplicada con enfoque cuantitativo es la adecuada, pues traduce series de contami-

nantes y variables meteorológicas en evidencia operativa alineada con guías y protocolos técnicos (OMS, 2006; MinAmbiente, 2021).

El enfoque de la investigación es cuantitativo, y se centra en la recolección y el análisis de información numérica (p. ej., $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , temperatura, precipitación, humedad, viento) para medir niveles, tendencias, estacionalidad y cumplimiento de referentes de salud. Este enfoque permite comparar resultados con valores guía, construir indicadores y modelar relaciones clima–contaminantes de forma objetiva y reproducible (OMS, 2006; EPA, s.f.). Se aplicarán procedimientos de control de calidad y análisis de series temporales, con apoyo en lineamientos MRV y guías técnicas sectoriales, incorporando cuando proceda analítica avanzada para clasificación o imputación (IDEAM, 2021; Rodríguez, 2020).

Metodología de desarrollo

La metodología Extreme Programming (XP) se adopta por su énfasis en calidad técnica y adaptación continua: TDD (desarrollo guiado por pruebas), programación en parejas, integración continua y retroalimentación frecuente con el “cliente” (autoridad ambiental/local y equipo académico). Esto es idóneo para una plataforma ambiental que ya opera (tableros en tiempo real por puntos de interés, interpretaciones, gráficos, tablas, exportación a Excel y mapa interactivo) y requiere iteraciones cortas para robustecer ingestión de datos, validaciones y reportes alineados con prácticas MRV y lineamientos de gestión de calidad del aire. El foco es transformar evidencia cuantitativa en decisiones operativas para prevención, mitigación y adaptación climática.

Planificar

En la fase de planificación se definió de manera individual el alcance del proyecto, el municipio a analizar y las variables de interés. Se revisó la documentación de una API de datos abiertos y se elaboró

una lista de funcionalidades: consultar datos históricos, organizarlos y mostrar tendencias generales.

Diseñar

En la fase de diseño se estableció la arquitectura por capas del sistema, se definieron los modelos de datos para contaminantes, variables climáticas y puntos de interés, y se diseñaron los prototipos de tableros, mapas interactivos y reportes orientados tanto a usuarios técnicos como al público general.

Desarrollar

Durante la fase de desarrollo se implementaron los módulos de ingestión, almacenamiento y procesamiento de datos, así como los tableros, mapas y reportes. Se trabajó en iteraciones cortas, aplicando principios de integración continua y refactorización para mejorar legibilidad, rendimiento y mantenibilidad del código.

Pruebas

En la fase de pruebas se aplicaron pruebas unitarias e integrales sobre los procesos de ingestión, validación y cálculo de indicadores. Posteriormente se ejecutaron pruebas funcionales y de aceptación con datos reales, ajustando la interfaz y los productos generados según su retroalimentación.

Población y muestra

La población objetivo de esta investigación está conformada por los habitantes de Aguachica (Cesar, Colombia), con énfasis en la ca-

becera urbana expuesta a variaciones de calidad del aire y condiciones climáticas. Se consideran como grupos sensibles a niñas y niños, personas mayores, gestantes y población con enfermedades respiratorias o cardiovasculares, así como trabajadores del transporte, comunidad educativa y usuarios de los servicios de salud del municipio.

La muestra está integrada por puntos de interés urbanos (corredores viales de alto flujo, terminal y patios, zonas comerciales/industriales, instituciones educativas y de salud y barrios de alta densidad) y sus series temporales de contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO) y variables meteorológicas. Se compondrá de datos abiertos (IDEAM/SISAIRE, reanálisis y sensores satelitales) y del sistema web local existente, seleccionados por representatividad espacial, disponibilidad/calidad y relevancia sanitaria. Los productos (tableros, mapas, reportes y alertas) se dirigen a la población urbana general y, prioritariamente, a los grupos sensibles e instituciones del municipio.

Resultados y discusión

En los resultados se observa que el sistema integra datos de múltiples puntos urbanos de Aguachica y genera mapas, gráficos y tablas donde, en el periodo analizado, predominan categorías de calidad del aire “buena” y niveles bajos de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Estos hallazgos se discuten frente a los informes nacionales de calidad del aire (IDEAM, 2022) y al reconocimiento de la contaminación atmosférica como problema de salud pública en Colombia por parte de la OPS/OMS, lo que resalta la importancia de contar con indicadores locales accesibles para la población y las autoridades.

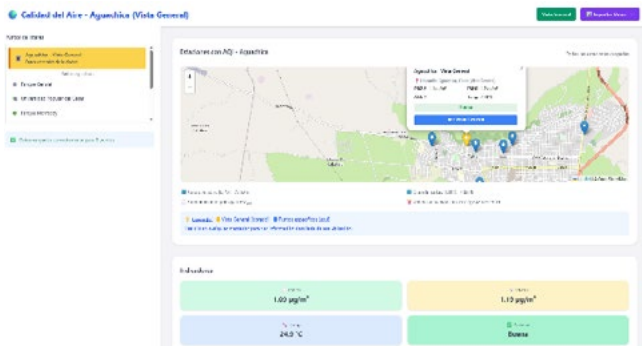


Figura 1. Vista general de Aguachica
Nota: elaboración propia.

En la Figura 1 se muestra la vista general para Aguachica, donde se cargan ocho puntos de interés urbanos y se observa una categoría global de calidad del aire “Buena”, con concentraciones bajas de PM_{2.5} y PM₁₀. Este comportamiento contrasta con lo reportado para grandes ciudades colombianas, donde estos contaminantes superan con frecuencia los límites recomendados por la OMS (MinAmbiente, 2018; IDEAM, y CCAC, 2019).

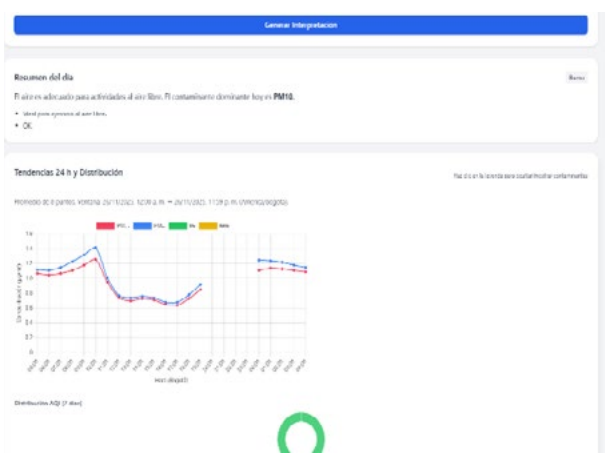


Figura 2. Tendencias en 24 horas
Nota: elaboración propia.

En la Figura 2 se presentan los indicadores diarios y las tendencias de 24 horas para los principales contaminantes, manteniéndose en rangos que el panel interpreta como adecuados para actividades al aire libre. Esta situación coincide con las guías de calidad del aire, que asocian los niveles bajos de material particulado con riesgos reducidos para la salud de poblaciones generales y sensibles.

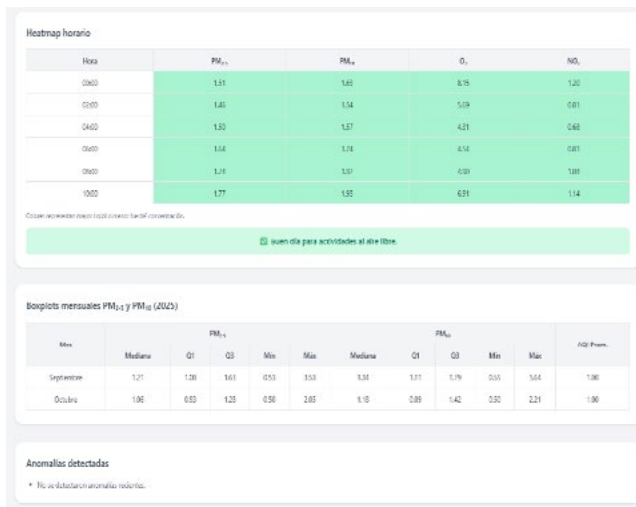


Figura 3. Patrones horarios y mensuales
Nota: elaboración propia.

La Figura 3 integra un heatmap horario y boxplots mensuales de PM_{2.5} y PM₁₀, donde predominan valores en intervalos reducidos y asociados a buena calidad del aire, sin anomalías recientes. Estos resultados muestran cómo el sistema de datos abiertos permite reconstruir indicadores locales en un municipio que carece de estaciones oficiales de monitoreo, contribuyendo a cerrar la brecha de información para la toma de decisiones ambientales en Aguachica (Vélez, 2019; Banco Mundial, 2023).

Conclusiones

El desarrollo del sistema de análisis de datos abiertos para Aguachica evidencia el potencial de las herramientas tecnológicas para fortalecer la vigilancia ambiental y la toma de decisiones basadas en evidencia, especialmente en territorios sin estaciones oficiales de monitoreo.

La integración de módulos de ingestión, procesamiento y visualización interactiva permite reconstruir indicadores de calidad del aire y variables climáticas, democratizando el acceso a información local sobre contaminantes como $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

El uso de una metodología de desarrollo iterativa alineada con guías y protocolos técnicos garantiza que los productos del sistema (mapas, tableros, reportes y alertas) respondan a los estándares recomendados para la evaluación de la calidad del aire y la protección de la salud.

Los resultados obtenidos muestran, para el periodo analizado, predominio de categorías de aire “bueno” y ausencia de anomalías recientes, lo que ofrece un insumo inicial para interpretar riesgos y planear intervenciones preventivas en grupos sensibles. Finalmente, el sistema sienta las bases para un futuro observatorio ambiental local en Aguachica y sugiere una ruta replicable en otros municipios que enfrentan brechas de información sobre calidad del aire y clima.

Referencias

- Environmental Protection Agency. (s.f.). *Guía de calidad del aire para contaminación por partículas*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Gobierno de México. (2020). *Comunicado índice calidad aire 05 2020 FINAL v3*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2020). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2020*. IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2021). *Informe de calidad del aire año 2021*. IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2022*. IDEAM; ANDI.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024a). *Boletín de calidad del aire junio 2024* (BCA No. 09). IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024b). *Informe anual calidad del aire 2024*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-a). *Calidad del aire y salud*. MinAmbiente; Ministerio de Salud y Protección Social.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-b). *Estrategia nacional de calidad del aire*. MinAmbiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire: Manual de diseño*. MinAmbiente.
- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *El cambio climático y sus efectos en la salud*. OMS.

- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. OMS.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Contaminación atmosférica y salud infantil: Prescribir aire limpio*. OMS.
- Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). *La calidad del aire en Colombia: Un problema de salud pública*. OPS/OMS.
- Rodríguez, A. (2020). *Guía de transporte, cambio climático y calidad del aire* (SET2020). GIZ.
- Serna M., M. A. (2024). Aplicación de la inteligencia artificial en la evaluación del impacto ambiental de proyectos de ingeniería. *Magazine de las Ciencias Revista de Investigación e Innovación* 9(3), 99-114.
- Toro, R. (s.f.). *Comprendiendo la calidad del aire*. Benton County Health Department.
- Uribe Botero, A. (2009). Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería*, 30, 110-117. <https://doi.org/10.16924/revinge.30.14>
- Valencia, S. (s.f.). Contaminación atmosférica en centros urbanos. *Revista Luna Azul*, 72, 193-204.
- Vargas, J. (2019). Impacto de la contaminación auditiva sobre el ambiente y la salud. *Mundo Fesc*, 13(27), 7-20.
- Vélez, P. (2019). Efectos del cambio climático en la salud de la población colombiana. *Duazary*, 16(2), 319-333.
- World Bank. (2023). *Impacto del cambio climático en la salud en Colombia y recomendaciones para mitigación y adaptación*. Banco Mundial.
- World Health Organization. (s.f.). *Preguntas y respuestas sobre calidad del aire*. Health and Environment Alliance.
- Zuluaga, G. (2013). Niveles de contaminantes en el aire de Cartagena, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 15(4), 612-624.

Lizeth Badillo Duran

Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica | Aguachica | Colombia

<https://orcid.org/0009-0004-2169-8556>

lizethbadillo@unicesar.edu.co

lizethbadillooduran@gmail.com

Ingeniera de Sistemas, Magister y docente de la Universidad Popular del Cesar – Seccional Aguachica

Luis Manuel Palmera Quintero

Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica | Aguachica | Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-3242-2115>

Impalmera@unicesar.edu.co

Impalmera04@gmail.com

Doctor en Ciencias de la Educación, Magister en Gobierno Tecnologías de la Información, Investigador Junior, Docente categoría asociado de la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica.

Karen Cristina Coronel Robles

Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica | Aguachica | Colombia

<https://orcid.org/0009-0002-7466-5702>

kcoronelrobles@gmail.com

Ingeniera Ambiental Docente del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Popular del Cesar – Seccional Aguachica

Didier Fernando Guerrero Sumalave

Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña | Ocaña | Norte de Santander | Colombia

didierguerrero@unicesar.edu.co

Magister en Gobierno en Tecnologías de la Información, docente catedrático de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Open data analysis system to assess air quality and climate in rural areas of Cesar**Abstract**

Air pollution is a priority public health problem in Colombia and is exacerbated in municipalities lacking monitoring stations, such as Aguachica, Cesar. This study presents the design and implementation of an open data analysis system to assess air quality and climate in Aguachica. The system integrates pollutant data ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO) and meteorological variables from official and public sources, processes them using quantitative methods, and visualizes them through maps, interactive dashboards, and downloadable reports. The methodology combines applied research with a quantitative approach and an adaptation of Extreme Programming to structure the planning, design, development, and testing phases. The results from the analyzed period show a predominance of "good" air quality categories and an absence of recent anomalies, demonstrating the tool's potential for generating local indicators in areas without continuous monitoring. The system is poised to serve as input for environmental

monitoring strategies, education, and the formulation of territorially focused public policies in Aguachica.

Keywords: Air; Air quality; Air pollution; Climate change; Public health

Sistema de Análise de Dados Abertos para Avaliar a Qualidade do Ar e o Clima em Áreas Rurais do Cesar, Colômbia

Resumo

A poluição atmosférica é um problema prioritário de saúde pública na Colômbia e se agrava em municípios que carecem de estações de monitoramento, como Aguachica, Cesar. Este estudo apresenta o desenho e a implementação de um sistema de análise de dados abertos para avaliar a qualidade do ar e o clima em Aguachica. O sistema integra dados de poluentes ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO) e variáveis meteorológicas de fontes oficiais e públicas, processa-os por meio de métodos quantitativos e os visualiza por meio de mapas, painéis interativos e relatórios para download. A metodologia combina pesquisa aplicada com abordagem quantitativa e uma adaptação do Extreme Programming para estruturar as fases de planejamento, desenho, desenvolvimento e testes. Os resultados do período analisado mostram predominância de categorias de qualidade do ar "boa" e ausência de anomalias recentes, evidenciando o potencial da ferramenta para gerar indicadores locais em territórios sem monitoramento contínuo. O sistema se configura como insumo para estratégias de vigilância ambiental, educação e formulação de políticas públicas com abordagem territorial em Aguachica.

Palavras-chave: Ar; Qualidade do ar; Poluição atmosférica; Mudanças climáticas; Saúde pública