

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Herramienta automatizada de Gestión Ambiental para el Pronóstico de Contaminación Atmosférica en Villa Clara/ Automated environmental management tool for air pollution forecasting in Villa Clara

Leidybell Leyva Rodríguez

Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara

lleidybell@gmail.com

Recibido: 28/09/25

Aceptado: 30/10/25

Resumen

La contaminación atmosférica ha emergido como uno de los desastres más alarmantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, convirtiéndose en una crisis tanto a nivel global como local. En este contexto, los sistemas de alerta temprana se presentan como una solución efectiva para informar sobre las posibles consecuencias asociadas a este fenómeno medioambiental. En la provincia de Villa Clara, Cuba, el Centro Meteorológico Provincial ha participado en el monitoreo de las fuentes fijas de contaminación existentes en el área. Mediante el análisis de este proceso, se hallaron claras limitaciones en términos de eficiencia, precisión y oportunidad en la detección de posibles eventos negativos. Debido a esta problemática, el objetivo de la investigación es desarrollar una herramienta automatizada de alerta temprana para el pronóstico de episodios críticos de contaminación en Villa Clara. El método implementado vincula el análisis de variables meteorológicas, así como la ubicación geográfica de fuentes fijas de contaminación y asentamientos poblacionales. Haciendo uso de tecnologías tales como, modelos de pronóstico meteorológico y herramientas de análisis geoespacial. Como resultado, se obtuvo una aplicación de escritorio capaz de clasificar el nivel de peligro de estos episodios contaminantes y generar informes accesibles en apoyo a la toma de decisiones. Este enfoque integral mejora la eficiencia y precisión en la notificación de eventos perjudiciales, convirtiéndose en una herramienta útil para la gestión ambiental en la región.

Palabras clave: Calidad del aire, Fuentes fijas, Informatización, Impactos ambientales, Prevención.

Abstract

Air pollution has emerged as one of the most alarming disasters facing humanity in the 21st century, becoming a crisis at both the global and local levels. In this context, early warning systems are presented as an effective solution for reporting on the potential consequences associated with this environmental phenomenon. In the province of Villa Clara, Cuba, the Provincial Meteorological Center has participated in monitoring stationary sources of pollution in the area. Through the analysis of this process, clear limitations were found in terms of efficiency, accuracy, and timeliness in detecting potential negative events. Due to this problem, the objective of this research is to develop



an automated early warning tool for forecasting critical pollution episodes in Villa Clara. The implemented method links the analysis of meteorological variables, as well as the geographic location of stationary sources of pollution and population settlements, making use of technologies such as meteorological forecasting models and geospatial analysis tools. As a result, a desktop application was developed that can classify the hazard level of these pollution episodes and generate accessible reports to support decision-making. This comprehensive approach improves the efficiency and accuracy of reporting harmful events, making it a useful tool for environmental management in the region.

Keywords: Air quality, Computerization, Stationary sources, Prevention, Environmental impacts.

Introducción

La contaminación atmosférica ha emergido como uno de los desastres más alarmantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, afectando a millones de personas en todo el mundo. Las emisiones provenientes de diversas fuentes contribuyen a la liberación de contaminantes nocivos, los cuales no solo deterioran la calidad del aire, sino que provocan graves repercusiones en la salud humana. Esta problemática no se limita a un ámbito global, sino que también se manifiesta a nivel local, donde las actividades económicas de los ciudadanos representan un desafío para la calidad del aire en los centros urbanos. En un mundo en constante crecimiento, la preocupación por la contaminación del aire se ha vuelto cada vez más apremiante, ya que las poblaciones urbanas continúan expandiéndose y las actividades industriales se incrementan (Palacio Carvajal y Vega Cadavid, 2023).

Sin embargo, la creciente concienciación sobre el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente ha impulsado el desarrollo y la adopción de diversas tecnologías y soluciones innovadoras para enfrentar la contaminación atmosférica y sus consecuencias.

En este sentido los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) constituyen herramientas de gestión ambiental para la predicción de episodios graves principalmente en las grandes ciudades, permiten a las autoridades sanitarias correspondientes conocer, con cierta certeza, el probable grado de contaminación atmosférica que habrá en un determinado lapso de tiempo. Estas técnicas se diseñan con el fin de reducir el tiempo entre la emisión de una alerta y la activación de la respuesta para prevenir y mitigar los efectos adversos (Astros Fonseca, 2019).

Su implementación implicó un cambio en la manera en que se comunicaba e informaba a la sociedad sobre situaciones meteorológicas peligrosas. Comparado con las alertas anteriores, que se brindaban hasta el año 2020, los SAT son un sistema con alcance visual, lo que resulta ventajoso al momento de identificar rápidamente una amenaza (Fernández *et al.*, 2023). Actualmente varios países se han hecho partícipes de esta solución, ejemplo de ello es el proyecto Life Baetulo desarrollado en Cataluña, España. Como resultado de esta iniciativa se obtuvo una plataforma SATI la cual cuenta con predicción anticipada de episodios relevantes derivados del

clima, monitoreo en tiempo real de eventos climáticos a partir de sensores ubicados estratégicamente, estimación de zonas de peligro y riesgo (mapas) mediante el uso de herramientas avanzadas de modelización off-line, identificación y georreferenciación de elementos vulnerables e infraestructuras críticas potencialmente afectadas. Además de contar con aplicación móvil para alertar a los ciudadanos sobre eventos potenciales o en curso que pueden tener un impacto en su salud o propiedades e informarles sobre aquellas acciones de autoprotección que pueden llevar a cabo individualmente para evitar impactos mayores (Martínez Puentes *et al.*, 2022). En el caso de Latinoamérica, Colombia destaca por sus avances e investigaciones en este campo, entre ellos en la Universidad de Antioquia con la creación de una herramienta de monitoreo para la adquisición de datos de la red de calidad del aire en Medellín, este sistema de notificación automático informa en tiempo real mediante alertas enviadas cada treinta minutos si alguna estación ha dejado de recibir datos (Gómez Monsalve, 2023).

En Villa Clara, Cuba, el Centro Meteorológico Provincial (CMPVC) lleva a cabo la vigilancia de la calidad del aire como extensión de esta labor científica, con el objetivo de conservar la pureza ambiental estableciendo los límites tolerables de contaminación y dejando en manos de las administraciones locales el diseño y la adopción de medidas para garantizar que no se supere dicho grado.

Entre las tareas relacionadas establecidas se encuentra el monitoreo de las distintas fuentes fijas de contaminación del territorio y por consiguiente la clasificación del nivel de peligro de ocurrencia de un episodio crítico de contaminación atmosférica (ECCA), así como la estimación del tiempo de llegada de la nube de contaminante a los posibles poblados afectados. Sin embargo, este proceso se basa en métodos manuales para la recopilación, análisis y difusión de la información correspondiente, presentando de esta forma claras limitaciones en términos de eficiencia, precisión y oportunidad en la detección y notificación de los episodios. Debido a esta problemática, el objetivo de la investigación es desarrollar una herramienta automatizada de alerta temprana para el pronóstico de episodios críticos de contaminación en Villa Clara.

La implementación de este programa será capaz de prever de manera eficaz los episodios críticos de contaminación, lo que permite a las autoridades y responsables tomar decisiones informadas con antelación. Esto facilita la adopción de medidas preventivas más efectivas, protegiendo así a las comunidades cercanas a las fuentes de contaminación.

Desde el punto de vista social, esta herramienta contribuye directamente a la protección de la salud pública, especialmente para grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias.

Al ofrecer información oportuna sobre los riesgos asociados a las emisiones atmosféricas, se fomenta la concienciación sobre la importancia de la calidad del aire, mejorando la percepción del riesgo entre la población y promoviendo su participación activa en la protección de la salud. En términos económicos, la herramienta ayuda a prevenir impactos negativos que podrían acarrear costosas consecuencias para las autoridades locales y las empresas. Al permitir una evaluación

anticipada y precisa de los peligros de eventos críticos, se minimizan las pérdidas económicas en sectores como la agricultura y la construcción, además de reducir la posibilidad de sanciones por incumplimiento de regulaciones ambientales. Esto, a su vez, contribuye a disminuir los costos asociados con la gestión inadecuada de la contaminación atmosférica. Finalmente, en relación con el medio ambiente, el sistema desempeña un papel crucial en el manejo adecuado de las emisiones atmosféricas, lo que reduce los impactos negativos en los ecosistemas, incluyendo la flora, fauna y acuíferos. Al proporcionar información detallada sobre la contaminación, se fortalecen las capacidades organizativas para mitigar sus efectos en la biodiversidad y los recursos naturales locales, promoviendo un entorno más saludable y sostenible

Metodología

Datos:

Para el desarrollo de la investigación se tomaron como puntos de referencia geográficos 98 ubicaciones clasificadas como Parcialmente Bien Ubicadas y 59 Mal Ubicadas, para un total de 157 fuentes de contaminación, representando el 16% de las existentes en la región de Villa Clara según el inventario de fuentes fijas realizado en 2024. Dicha información es almacenada en una base de datos geográfica que permite su análisis y procesamiento de una manera eficiente. Para cada uno de estos puntos geoespaciales se analizan las variables meteorológicas de dirección y velocidad del viento. Datos obtenidos con una frecuencia de dos veces al día (00Z y 12Z), procedentes del modelo de pronóstico meteorológico Global Forecast System (GFS). Este sistema de predicción numérica del tiempo es considerado la piedra angular del conjunto de guías numéricas de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP). Contiene un modelo informático global y un análisis variacional que genera datos para docenas de variables atmosféricas (*Documentation- GFS - Virtual Lab*, 2025). Desde su última versión el modelo cuenta con una resolución espacial de aproximadamente 13 km, actualizando la información disponible cada 6 horas, lo cual proporciona una mayor precisión en las predicciones. Además, genera pronósticos hasta 16 días en el futuro mediante la integración de datos de satélites y estaciones meteorológicas, recurso valioso para planificación y preparación ante eventos meteorológicos (Ganai *et al.*, 2021; Huang y Ding, 2021; Li y Shi, 2022).

Programas Computacionales:

En la implementación de esta aplicación se hizo uso de diversas tecnologías, tal es el caso de Python, lenguaje de programación seleccionado debido a sus características versátiles y adecuadas para el desarrollo de diversas aplicaciones, desde software de escritorio hasta páginas web (Sánchez Mesa, 2022). Como su entorno de desarrollo por excelencia se empleó PyCharm, entorno que ofrece una consola interactiva y permite personalizar la aplicación según las necesidades del proyecto, además de ofrecer varias librerías y paquetes científicos que brindan una amplia gama de funcionalidades que enriquecen el análisis y la visualización de datos geoespaciales (Saabith *et al.*,

2021).

La herramienta más relevante utilizada en este aspecto fue GeoPandas, esta librería extiende la funcionalidad de Pandas al incorporar soporte para datos geoespaciales y se encuentra entre las más completas para análisis GIS en Python (Hewitt, 2024). La misma se utilizó para almacenar y manipular información en la base de datos de tipo Spatialite, una extensión de SQLite diseñada para el manejo de datos espaciales, seleccionada por su ligereza y facilidad de implementación, sin requerir un servidor, lo que resulta ventajoso para aplicaciones de escritorio integradas en el dispositivo del usuario (Pérez, 2020)

Resultados y discusión

El resultado de este trabajo derivó en el desarrollo de una aplicación de escritorio operativa, cuyas funcionalidades responden y dan solución mediante la automatización, a los problemas presentados durante el proceso de clasificación de episodios críticos de contaminación atmosférica en el CMPVC. Se establecieron medidas de seguridad para el acceso a la información y recursos de la aplicación, que incluyen la autenticación mediante contraseña o pin y la encriptación de estos datos. Las variables meteorológicas utilizadas en el pronóstico se gestionan de forma automática mediante el uso de un modelo de pronóstico meteorológico, además de contar con la visualización gráfica de las mismas.

Se implementó una base de datos capaz de gestionar de manera eficiente gran el volumen de datos geoespaciales manejados y se utilizó un mapa para la representación de los diferentes puntos de interés.

Se optimizó el proceso de clasificación de un evento crítico, el cual inicia mediante una consulta de los datos meteorológicos de velocidad y dirección del viento para cada fuente fija almacenada en la base de datos y se le asigna el valor de las variables correspondientes. Teniendo en cuenta la dirección del viento, se toman los posibles asentamientos en peligro en un perímetro de 30 km. Tras realizada esta primera etapa se calcula el pronóstico del tiempo de llegada de la nube contaminante a cada poblado el cual se mide en minutos.

El valor resultante, así como el tiempo necesario para la evacuación de las personas expuestas en este escenario (información proporcionada por la Defensa Civil de cada municipio) se utilizan para obtener el valor cuantitativo del nivel de peligro de un evento, teniendo en cuenta este resultado se clasifican según los rangos expuestos en la tabla 1 para obtener su valor cualitativo.

Clasificación	Rango
Bajo	≤ 0.25
Medio	≤ 0.5
Moderado	≤ 0.75
Alto	> 0.75

Tabla 1. Rangos del nivel de peligro de un ECCA

Como salida principal, el sistema proporciona un informe cada 12 horas con la información recopilada de cada fuente fija analizada. Los reportes incluyeron las predicciones meteorológicas del día en cuestión y los siguientes cuatro días, junto con los datos de los asentamientos poblacionales en peligro y su riesgo correspondiente. **En la figura 1** se observa una muestra del producto final.

Pronóstico de Alerta Temprana de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica

Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara (CMPVC)

Grupo de Calidad del Aire

Municipios ▾

Fecha: 30-10-2024 12:00:00 AM

Municipio: Sagua La Grande

Comportamiento del Viento			Fuente Fija	Asentamiento					Clasificación
Fecha	Dirección	Velocidad (m/s)	Causante	Asentamiento en peligro	Distancia entre ubicaciones (km)	Tiempo de evacuación (min)	Tiempo de llegada de contaminantes (min)	Nivel de peligro	Categoría
2024-10-30	255.227753	10.990911	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	Quemado de Güines	17.61	225	26.71	0.1187	Bajo
		10.990911	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	El Cedro	30.97	179	46.96	0.2624	Medio
2024-10-31	258.631165	10.593554	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	Quintín Banderas	28.99	726	45.60	0.0628	Bajo
		10.593554	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	El Conde	21.99	49	34.59	0.7060	Moderado
2024-11-01	256.821045	9.897820	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	San Juan de Amaro	11.97	596	20.16	0.0338	Bajo
		9.897820	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	Esperanza	20.71	45	34.87	0.7748	Alto
2024-11-02	247.348816	10.199821	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	26 de Julio	13.69	384	22.37	0.0582	Bajo
		10.199821	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	El Cedro	30.97	179	50.60	0.2827	Medio
2024-11-03	243.646454	10.199821	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	San Juan de Amaro	11.97	596	19.57	0.0328	Bajo
		10.669703	Electroquímica de Sagua Cloro Sosa	Las Glorias	14.32	910	22.37	0.0246	Bajo

Figura 1. Reporte de Pronóstico de Alerta Temprana

La herramienta obtenida permite un monitoreo continuo, por lo tanto, los reportes generados ofrecen datos precisos y en tiempo real sobre la calidad del aire y las condiciones meteorológicas, facilitando a las autoridades responsables la identificación de áreas problemáticas y la toma de decisiones informadas, mejorando la efectividad de las medidas preventivas. Lo cual contribuye a la protección de ecosistemas locales, promoviendo un entorno más sostenible, fortalece la formulación de políticas ambientales, asegurando que estas se basen en las necesidades reales de la comunidad y capacita a las autoridades locales en el uso de herramientas tecnológicas para el monitoreo y gestión ambiental, promoviendo la autosuficiencia.

Se introduce un enfoque innovador que combina la automatización del proceso mediante análisis geoespacial y pronósticos meteorológicos extendidos. Una aplicación con estas características no solo mejora la capacidad de respuesta ante episodios críticos, sino que también fortalece la gestión ambiental de la región en su conjunto. Al proporcionar herramientas para la prevención, monitoreo y divulgación, contribuye a un enfoque más proactivo y sostenible en la protección de la calidad del aire y el bienestar de la comunidad.

Conclusiones

Se desarrolló una herramienta automatizada de alerta temprana destinada a pronosticar episodios críticos de contaminación atmosférica en Villa Clara. Este programa se basó en el análisis de variables meteorológicas y la localización geográfica de fuentes fijas de contaminación.

Su implementación representa un avance en la eficiencia y precisión de las notificaciones sobre eventos contaminantes. Además, se establece como un recurso para la gestión ambiental en Villa Clara, contribuyendo a un manejo más proactivo de la calidad del aire.

Se sugiere continuar con la optimización de la herramienta desarrollada, así como explorar su integración con otros sistemas de monitoreo ambiental.

Referencias Bibliograficas

Astros Fonseca, I. R. (2019). Propuesta de sistema de alerta temprana bajo el enfoque de evaluación de riesgo por metales vehiculados en agua de consumo humano en Colombia.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76559>

Documentation—GFS - Virtual Lab. (2025, mayo 22). <https://vlab.noaa.gov/web/gfs/documentation>

Fernández, C., Menalled, M., Saucedo, M., y Cruz Díaz, G. (2023). Sistema de Alerta Temprana: Preguntas frecuentes y definiciones.

- Ganai, M., Tirkey, S., Krishna, R. P. M., y Mukhopadhyay, P. (2021). The impact of modified rate of precipitation conversion parameter in the convective parameterization scheme of operational weather forecast model (GFS T1534) over Indian summer monsoon region. *Atmospheric Research*, 248, 105185.
- Gómez Monsalve, J. A. (2023). Sistema de Alerta temprana de Medellín—Calidad del aire. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/33716>
- Hewitt, C. (2024). Exploring Canadian Geospatial Data with GeoPandas in Colab Notebooks. *Bulletin Association of Canadian Map Libraries and Archives (ACMLA)*, 173, Article 173.
- Huang, X., y Ding, A. (2021). Aerosol as a critical factor causing forecast biases of air temperature in global numerical weather prediction models. *Science Bulletin*, 66(18), Article 18.
- Li, R., y Shi, J. (2022). The Preliminary Evaluation of Global Forecast System 384-Hour Predicted Atmosphere Data for Water Deficit Application in China. *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6546-6549. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9884191/>
- Martínez Puentes, M., Villanueva Blasco, A., y Russo, B. (2022). Proyecto Life Baetulo en Badalona: Gestión operativa de crisis ante eventos climáticos. *Agua, energía y medio ambiente*, 895-904.
- Palacio Carvajal, J., y Vega Cadavid, D. A. (2023). Contaminación del aire en el municipio de Girardota Antioquia en los últimos cinco años [Thesis, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. <https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/18466>
- Pérez, R. N. (2020). Cálculo de rutas óptimas en mapas usando SQLite/Spatialite [PhD Thesis, Universidad de La Habana]. https://fototeca.uh.cu/files/original/2177027/Calculo_de_rutas_optimas_en_mapas_usando_SQLiteSpatialite.pdf
- Saabith, S., Vinothraj, T., y Fareez, M. (2021). A review on Python libraries and Ides for Data Science. *Int. J. Res. Eng. Sci*, 9(11), Article 11.
- Sánchez Mesa, Y. L. (2022). Tienda virtual de modelos tridimensionales Cosmox [bachelorThesis, Universidad de las Ciencias Informáticas. Facultad 4]. <https://repositorio.uci.cu/jspui/handle/123456789/10622>