

Evaluación comparativa de sensores de partículas en Santa Clara, Cuba

Arianna Alvarez Cruz, Mayra C. Morales Pérez, Daniellys Alejo Sánchez, Rosa Amalia González Rivero, Luis Hernández Santana

RESUMEN / ABSTRACT

El material particulado es uno de los contaminantes criterio del aire regulado de acuerdo a estándares establecidos por la OMS y las normas nacionales. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo y la implementación de sensores de bajo costo para su monitoreo, pero presentan limitaciones en la fiabilidad de sus datos. El objetivo de este artículo es evaluar dos modelos de sensores de bajo costo (OPC-N3 y el SDS011) en un estudio de campo en el período lluvioso con y sin afectación de polvos del Sahara en Santa Clara, Cuba. Para ello, se monitorea el PM_{10} y el $PM_{2.5}$ en tres sitios de la carretera principal de Santa Clara. Se calcula el rendimiento del OPC-N3 en la medición de PM_{10} , comparado con la concentración determinada por gravimetría en un captador de pequeño volumen, mediante dos indicadores de desempeño, la raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el índice de Willmott (d). Los resultados se corresponden con las características de los escenarios evaluados, demostrando la fiabilidad de las mediciones de concentraciones de material particulado para los dos sensores y los experimentos de calibración del OPC-N3 para PM_{10} en el laboratorio fueron satisfactorios con bajos valores de RMSE y un índice de Willmott de 0,95. La evaluación de los sensores OPC-N3 y SDS011 en condiciones de campo en los dos escenarios demostró la fiabilidad de sus mediciones, la calibración del sensor OPC-N3 con el instrumento de referencia evidencia la factibilidad de uso de este sensor para la medición de PM_{10} .

Palabras claves: Partículas; Sensores de bajo costo; Monitoreo, Calibración

Particulate matter is one of the criteria air pollutants regulated according to standards established by the WHO and national regulations. Technological advances have allowed the development and implementation of low-cost sensors for monitoring, but they present limitations in the reliability of their data. This article aims to evaluate two low-cost sensor models (OPC-N3 and SDS011) in a field study in the rainy period with and without Saharan dust impact in Santa Clara, Cuba. For this purpose, PM_{10} and $PM_{2.5}$ are monitored at three sampling sites on the main road of Santa Clara. The performance of OPC-N3 in measuring PM_{10} , compared to the concentration determined by gravimetry in a small volume sampler, is calculated using two performance indicators, the root mean square error (RMSE) and the Willmott index (d). The results correspond to the characteristics of the evaluated scenarios, demonstrating the reliability of the measurements of particulate matter concentrations for the two sensors and the OPC-N3 calibration experiments for PM_{10} in the laboratory were satisfactory with low RMSE values and a Willmott of 0.95. The evaluation of the OPC-N3 and SDS011 sensors under field conditions in the two scenarios demonstrated the reliability of their measurements, the calibration of the OPC-N3 sensor with the reference instrument shows the feasibility of using this sensor for the measurement of PM_{10} .

Keywords: Particles; Low-cost sensors; Monitoring; Calibration

Comparative evaluation of particle sensors in Santa Clara, Cuba

1. -INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico, económico y social, en un mundo donde han ocurrido cambios drásticos y dramáticos en los ámbitos demográfico, económico y ecológico han llevado a las naciones a la adopción de medidas globales, regionales y nacionales para prevenir, atenuar y controlar estos impactos y desequilibrios.

Recibido: 03/2023 Aceptado: 05/2023

El aire, es un recurso que, aunque ilimitado y renovable es necesario proteger por la incidencia que tiene en la vida y por la degradación a que está siendo sometido por las actividades antropogénicas. El deterioro de la calidad del aire es uno de los principales problemas ambientales de las ciudades del mundo y la causa principal de su contaminación es el uso de los combustibles fósiles en procesos de combustión debido al uso extensivo de esta fuente de energía y a la dispersión de los contaminantes que se generan bajo determinadas condiciones meteorológicas [1]. En los países no desarrollados se relaciona además con el uso de tecnologías obsoletas en la producción y los servicios, el uso de combustible de mala calidad y el transporte vehicular con mal estado técnico.

De los contaminantes del aire las partículas son de gran interés dentro de los contaminantes criterios por su impacto a la salud fundamentalmente. El material particulado (PM) se origina de procesos naturales y antropogénicos y varía en tamaño, concentración y composición química. Este es regulado de acuerdo a estándares establecidos por la OMS y las normas nacionales que establecen límites permisibles en el rango de las fracciones del PM (PM_{10} y el $PM_{2,5}$) [2].

El PM_{10} y $PM_{2,5}$ tienden a formar suspensiones estables en el aire por la acción del viento cuya velocidad y dirección del viento son responsables de algunos mecanismos de emisión de partículas en la atmósfera, tales como la difusión y la turbulencia que propician la dispersión de partículas. Otros factores como la precipitación, la humedad relativa, la temperatura y la radiación influyen directamente en los niveles de su concentración en la atmósfera [3–5].

Dentro de los instrumentos de evaluación de la calidad del aire, el monitoreo de partículas se realiza con el objetivo de evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo, asociándolo con los fenómenos meteorológicos, composición química y origen, los cuales permitan orientar estrategias de control a las autoridades ambientales interesadas. La principal limitación para la investigación de este contaminante está relacionada con el equipamiento para la toma y recolección de la muestra, razón por la cual, en los últimos años, una solución atractiva a este problema ha sido el creciente número de monitores de calidad del aire basados en tecnologías de detección alternativas, como son los sensores de bajo costo [6–8].

Los sensores de bajo costo (LCS) por sus siglas en inglés se utilizan para recopilar datos de calidad del aire en tiempo real proporcionando datos de calidad del aire espaciales y temporales de alta resolución. Este tipo de sensores son una nueva tendencia en el monitoreo de la calidad del aire cuyas ventajas de esta tecnología son obvias al tener menor costo del equipo, así como de operación y mantenimiento, la comunicación en tiempo real, la generación de datos en volumen, que permite el desarrollo de programas de prevención y contingencia, la facilidad de difusión de los mismos al personal relacionándolo directamente con la prevención de la contaminación del aire [4,9]. Entre sus principales desventajas se tiene que aún no se cuenta con protocolos de calibración y operación estandarizados [10].

Estas desventajas en cuanto a rendimiento, deficiencias y la calibración de los LCS para material particulado se han analizado por varios autores [11]. Los estudios informan que los LCS son inestables y a menudo, se ven afectados por las condiciones atmosféricas: fundamentalmente la humedad relativa y temperatura [12,13].

Tagle M y colaboradores [14] encontraron que en análisis de correlación a niveles altos de humedades relativas los sensores de bajo costo estudiados revelan concentraciones 46% mayor que los de sistemas de referencia. En general hay consenso de que los prototipos evaluados exhiben desarrollos adecuados y pueden ser utilizados para monitorear niveles de $PM_{2,5}$ luego de corregir la humedad relativa.

Para la selección del sensor de PM de bajo costo se deben tener en cuenta estudios previos realizados por otros autores, así como las características técnicas, el precio y su disponibilidad en el mercado. Los autores probaron conocidos productos de bajo costo Sensores PM como SDS011 (Nova Fitness), PMS5003 (Plantower), OPC-N2 y OPC-N3 (Alphasense) para usarlos para mediciones de la calidad del aire ambiente. Para esta investigación se plantea como problemática comparar dos sensores el OPC-N3 de la empresa Alphasense porque mostró mejores resultados en comparación con otros sensores de PM de bajo costo y el SDS011 (Nova Fitness) por ser más económico que el OPC-N3 [7,15]. En tal sentido este trabajo tiene como objetivo evaluar dos modelos de sensores de bajo costo (OPC-N3 y el SDS011) en un estudio de campo en el período lluvioso con y sin afectación de polvos del Sahara en Santa Clara, Cuba.

2.- METODOLOGÍA

En este acápite se explica el equipamiento utilizado y las particularidades del sistema de medición diseñado y construido que incluye los sensores utilizados en el estudio de campo presentado en este trabajo para evaluar la temperatura, la humedad relativa, las concentraciones de material particulado (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1). Se realiza un procedimiento de calibración del sensor OPCN3 utilizado.

2.1.- CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE MONITOREO

El primer prototipo diseñado por [16] como sistema de monitoreo (Fig. 1) se compone de tres elementos básicos: un microcontrolador, un escudo registrador de datos que contiene el módulo de reloj en tiempo real y la tarjeta SD para el

almacenamiento de datos, y los sensores. Como computadora central se utilizó la placa de desarrollo Arduino UNO. Dispone de un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para programación y dispone de varias entradas y salidas analógicas y digitales para que el microcontrolador pueda conectarse a sensores. El reloj de tiempo real en el escudo del registrador de datos se utiliza para generar una marca de tiempo cuando se realiza la medición.



Figura 1

Prototipo HZS-GARP-AQ-03, Sensor OPC N3(b) , Sensor AM2315(c)

En la Fig. 1c se presenta el sensor AM2315 que es un sensor combinado de temperatura y humedad relativa dentro del mismo encapsulado. Este módulo incluye un termistor como elemento de medición para la temperatura y en el caso de la humedad posee un sensor capacitivo. Este producto ofrece una gran estabilidad en sus mediciones en largos periodos de uso, rápida respuesta y excelente calidad en sus mediciones.

Para cuantificar las concentraciones de material particulado se utiliza como todos los convencionales contadores ópticos de partículas (OPC por sus siglas en ingles), el sensor OPC-N3 que se muestra en la Fig. 1b mide la luz dispersada por partículas individuales transportadas en una corriente de aire de muestra a través de un rayo láser. Estas mediciones son utilizadas para determinar el tamaño de partículas en un rango de 0,35 μm a 40 μm y la concentración del número de partículas. La carga de masa de partículas: $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} , se calculan a partir de los espectros de tamaño de partícula y los datos de concentración, asumiendo la densidad y el índice de refracción. Tamaños inferiores se agrupan dentro de PM_1 . Para generar la corriente de aire el OPC-N3 utiliza un pequeño ventilador de bajo consumo. Posee un sensor combinado de temperatura y humedad dentro del propio encapsulado.

En el segundo prototipo [17] se utiliza un sensor de partículas SDS011 de la firma Nova Fitness que también es un sensor óptico Fig. 2 y puede obtener la concentración de partículas entre 0,3 y 10 μm en el aire. Tiene salida digital y el ventilador incorporado es estable y confiable. Este sensor tiene alta calidad y su vida útil es de hasta 8000 horas. En el prototipo también se incluye sensores de temperatura y humedad relativa BME280.



Figura 2

Sensor SDS011

En las Tablas. 1 y 2 aparecen las especificaciones de los sensores de partículas utilizados.

Tabla 1
 Descripción del sensor de partículas OPC-N3

Medición		Consumo	
Rango de partículas	0,35 hasta 40 $\mu\text{g} / \text{m}^3$	Modo medición	180 mA (típico)
Intervalo de muestreo	1 hasta 30 (segundos)	Modo Standy by	< 45 mA (típico)
Máxima razón de muestreo	10000/segundo	Rango de Voltaje	4,7~5,3V
Datos		Otras especificaciones	
Interfaz digital	SPI (datos y comunicación)	Rango de temperatura	-10 ~ +50°C
Almacenamiento	16 (GB) micro-SD (formato .CSV)	Rango de humedad	0 hasta 95 % (no condensado)

Tabla 2
Descripción del sensor de partículas SDS011

Medición		Consumo	
Rango de partículas	0,0-999,9 µg /m ³	Modo medición	70 mA±10 mA
Intervalo de muestreo	1 hasta 30 (segundos)	Modo Standy by	30 mA±10 mA
Máxima razón de muestreo	1 segundo	Rango de Voltaje	4,7~5,3V
Datos		Otras especificaciones	
Interfaz digital	UART	Rango de temperatura	-10 ~ +50 °C
Almacenamiento	-	Rango de humedad	Max 70 %

2.2.- CALIBRACIÓN DEL SENSOR OPC-N3

Las concentraciones máscas de OPC-N3 se calibraron utilizando mediciones gravimétricas de PM₁₀. La medición de calibración gravimétrica se realizó tres días de abril del 2021 durante 24 h. En el laboratorio se instaló el OPC y el captador de bajo volumen, LVS3.1 de la compañía Comde-Derenda para PM₁₀ que funcionó con un caudal de 2.06 m³/h. Las muestras se colectaron sobre papeles de filtros de celulosa MACHEREY-NAGEL MN1672 de 55 mm de diámetro. Los filtros fueron equilibrados a una humedad relativa entre 32 y 45 % a una temperatura entre 20 y 25 °C al menos 24 horas antes de ser pesados, tanto antes como después de colectadas las muestras. Se empleó la balanza Kern ABT120-50NM con resolución de 0,01 mg. Las lecturas del sensor fueron tomadas con una frecuencia de 5 minutos y determinados los promedios horarios durante las 24 horas. Para los valores reportados para el sensor en cada día se calcula la concentración ponderada en el tiempo (CPT) ajustado a las 24 horas de la medición gravimétrica mediante la ecuación 1:

$$CPT = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i * t_i)}{\tau} \quad (1)$$

Dónde: C_i: concentración de la sustancia nociva en el aire determinada mediante la muestra i (mg/m³), t_i: tiempo de duración de la toma de muestra i (min), τ: tiempo total de duración del muestreo (min)

Para el análisis estadístico se utilizaron: la raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), y el índice de concordancia (d), propuesto por Willmott [18].

2.3.- ESTUDIO DE CAMPO

La calidad del aire ha sido estudiado por diversos autores en la ciudad de Santa Clara, Cuba [19–21] y es la carretera Central principal arteria de ciudad la de mayor tráfico vehicular además de otras fuentes que contribuyen a la contaminación (Industria recicladora de neumáticos , torrefactora de café , cocinas centralizadas , pequeñas calderas de vapor y maquinas eléctricas de Diésel instaladas en hospitales) . Por tal razón, se decidió hacer el estudio con el prototipo 2 que incluye el sensor SDS011, en la misma carretera Central en dos puntos de muestreo (B y C), teniendo como referencia un estudio que hizo con el sensor OPC-N3 en un sitio de alta densidad de tráfico pero que en ese momento había restricciones al movimiento vehicular por fase 1 de recuperación post-COVID, pero en el que confluó un evento de los polvos del Sahara en junio del 2020. En la figura 3 aparece el mapa de ubicación de los sitios de muestreo.



Figura 3
Sitios de muestreo

En cada sitio de muestreo, los sensores se colocaron a 2,5 m de altura. La frecuencia de muestreo fue de 7 segundos con el OPC-N3 (punto A) y de 5 segundos con el sensor SDS011 (puntos B y C). Los cortos períodos de muestreo se reflejan en la Tabla 3.

Como se observa en esta tabla en cada período interesa comparar las mediciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en dos puntos cercanos (Ay B) en la misma fecha de años distintos con los dos sensores estudiados, con la particularidad que en el 2020 hubo escenario de polvo del Sahara pero que la contribución del resto de las fuentes era pobre por las restricciones en fase 1 de recuperación post-COVID. Con respecto al muestreo del punto C interesa comparar también los niveles de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en episodios de polvos del Sahara en dos puntos de la ciudad de Santa Clara (A y C).

Tabla 3
Período de muestreo

Punto de muestreo/Sensor	Período: Fecha/hora		Observaciones
	Inicio	Final	
A/OPC-N3	24/6/2020 00:00:04	25/6/2020 23:59:58	Incidencia directa de los polvos del Sahara Fase 1 recuperación post-Covid.
	25/6/2020 00:00:02	28/6/2020 14:14:45	
B/SDS011	18/6/2023 00:04:29	26/6/2023 18:20:25	Condiciones de vida normal en la ciudad.
C/SDS011	22/7/2023 14:09:59	24/7/2023 22:02:46	Incidencia directa de los polvos del Sahara sobre la ciudad Condiciones de vida normal en la ciudad.

Como se observa en este muestreo que es corto en cada período interesa comparar las mediciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en dos puntos cercanos (Ay B) en la misma fecha de años distintos con los dos sensores estudiados, con la particularidad que en el 2020 hubo escenario de polvo del Sahara pero que la contribución del resto de las fuentes era pobre por las restricciones en fase 1 de recuperación post-COVID. Con respecto al muestreo del punto C interesa comparar también los niveles de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en episodios de polvos del Sahara en dos puntos de la ciudad de Santa Clara (A y C).

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados se realizó aplicando los conceptos estadísticos mencionados anteriormente y aplicando la estadística descriptiva por medio del uso Microsoft Excel 2013 con un nivel de confianza de 0,5 %.

3.1.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS MEDICIONES DE PM_{10} DEL SENSOR OPC-N3 VS INSTRUMENTO DE REFERENCIA

En la Tabla 4. aparecen reflejados los resultados del estudio de calibración. Estos mostraron que la concentración ponderada en el tiempo para el sensor fue de $1,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,429 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5,468 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente en los días del experimento, comparada con valores muy similares a los obtenidos por el método gravimétrico de $1,617 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1,213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1,011 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De los parámetros de eficiencia estadística calculados, el índice de Willmott que representa la relación del error cuadrado medio y el error potencial (valor más grande que la diferencia al cuadrado puede alcanzar) fue muy significativo con valor de 0,95. La raíz de la media del error cuadrático RMSE, que mide la variación de los valores calculados respecto a los observados muestra diferencias pequeñas de $0,097 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,216 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4,457 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 4

Resultados de calibración en el laboratorio

Filtro	Fecha/hora	m inicial (mg)	m final (mg)	V _{aire muestreado} (m ³)	LVS 3.1 PM ₁₀ (µg/m ³)	CPT Sensor OPC-N3 PM ₁₀ (µg/m ³)
1	21-22/4/21 12:40	148,39	148,47	49,454	1,6177	1,5203
2	22-23/4/21 13:20	167,66	167,72	49,454	1,2132	1,4295
3	27-28/4/21 09:20	164,00	164,05	49,454	1,0110	5,4682

Con estos resultados en condiciones de laboratorio y valores de temperatura y humedad relativa controladas se ratifica lo planteado por varios autores [22,23]. El sensor OPC-N3 de la compañía Alphasense utiliza controles internos más precisos de temperatura, humedad relativa y retroalimentación de potencia láser en sus dispositivos para manejar la información de validación/corrección de datos y es preciso en las mediciones de la concentración másica de PM.

3.2.- RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS MEDICIONES DE PM₁₀ DEL SENSOR OPC-N3 Y SDS011 EN EL ESTUDIO DE CAMPO

3.2.1.- COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES ENTRE LOS SITIOS A Y B

En la Fig. 4 se muestran las concentraciones promedio horarias obtenidas en el punto de muestreo A y C durante el monitoreo realizado en junio 2020 con el sensor OPC-N3 y en junio del 2023 con el sensor SDS011.

La tabla 5 presenta la estadística descriptiva de las series de tiempo registradas en junio del 2020 en el punto A con el sensor OPC-N3 y en junio del 2023 en el punto B con el sensor SDS011.

Tabla 5

Estadística descriptiva del promedio del muestro de campo en Santa Clara (puntos A y B)

Sistema	VARIABLES	Promedio 1h ±SD	Asimetría	Promedio 24h ±SD	Asimetría
OPC N3	PM10	15,786±7,52	1,777	15,325±3,64	0,338
	PM2,5	9,142± 4,066	1,651	8,66±2,33	0,904
SDSO11	PM10	16,466±6,776	1,129	16,836±3,861	0,53
	PM2,5	6,095±2,532	0,949	6,24±1,429	0,592

Como se puede observar en la Tabla 5 ningún valor excede el establecido en la Norma Cubana NC1020:2014 [24] ni por la OMS cuyos valores son coincidentes de 25 µg/m³ y 50 µg/m³ y 100 50 µg/m³ y 200 50 µg/m³ para PM_{2,5} y PM₁₀ en 24 h y 1 h respectivamente lo cual es coherente con los resultados esperados en el periodo lluvioso y sin fuentes que influyan significativamente. En cuanto al análisis comparativo de los sensores se considera que no existen diferencias significativas entre los valores de concentración de partículas y que los coeficientes de asimetría dan valores positivos por lo que los datos tienen una distribución sesgada a la izquierda, lo que significa que la mayor cantidad de valores se encuentra por debajo de la media. En la Fig. 4 se evidencia que los valores para PM₁₀ y PM_{2,5} siguen la misma tendencia en su serie de tiempo y que los picos de concentración coinciden para los dos tamaños de partículas, además se observa que los picos de PM coinciden con las temperaturas más bajas entre 4 y 6 del mañana horario de mayor estabilidad atmosférica. Las variables meteorológicas tuvieron un comportamiento estable de temperatura y humedad relativa durante este muestreo.

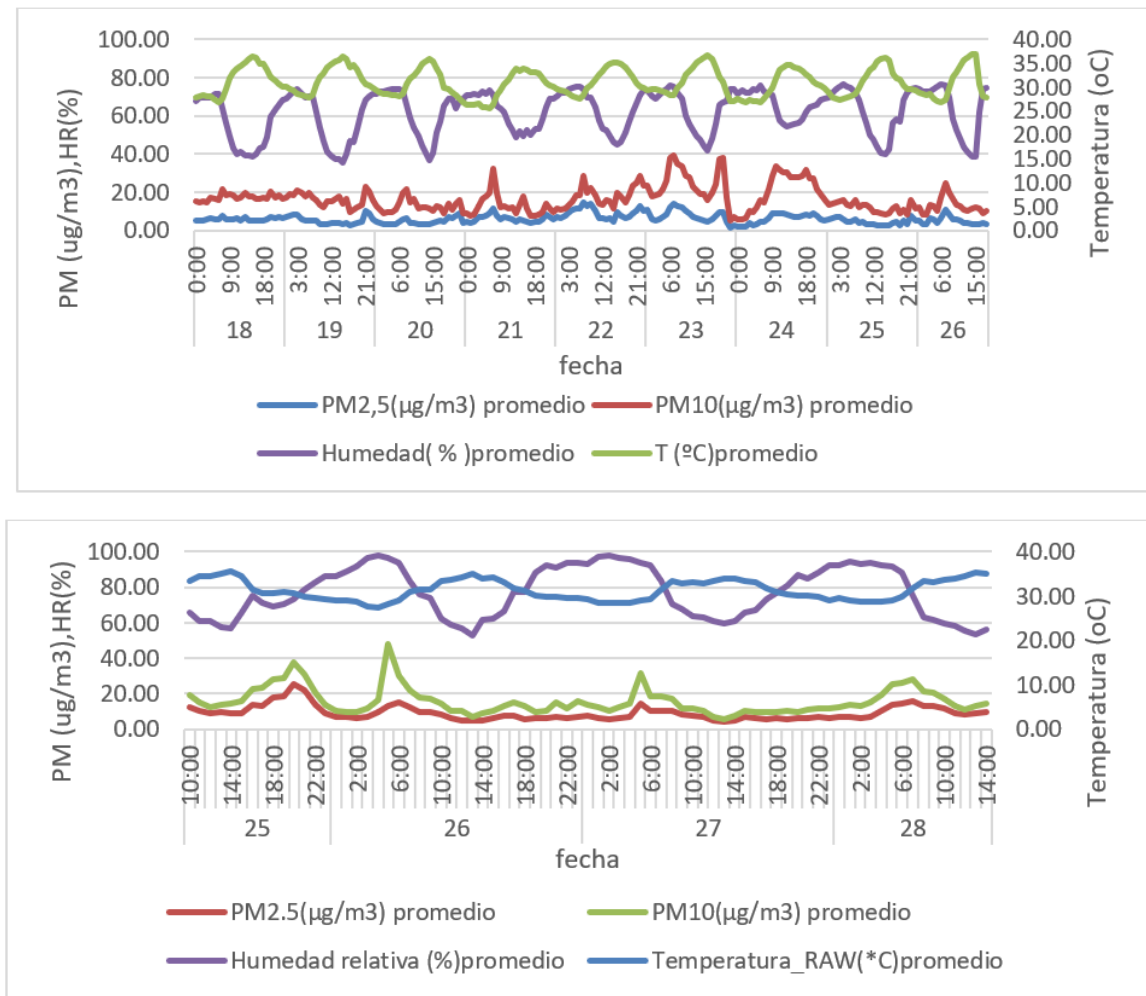


Figura 4

Concentraciones promedio horarias en el punto A y B

3.2.2.-COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES ENTRE LOS SITIOS A Y C. POLVOS DEL SAHARA.

En la figura 5 se muestran las concentraciones promedio horarias obtenidas en los puntos de muestreo A y C durante los monitoreos realizados en junio 2020 y julio del 2023 con incidencia de los polvos del Sahara en la ciudad de Santa Clara.

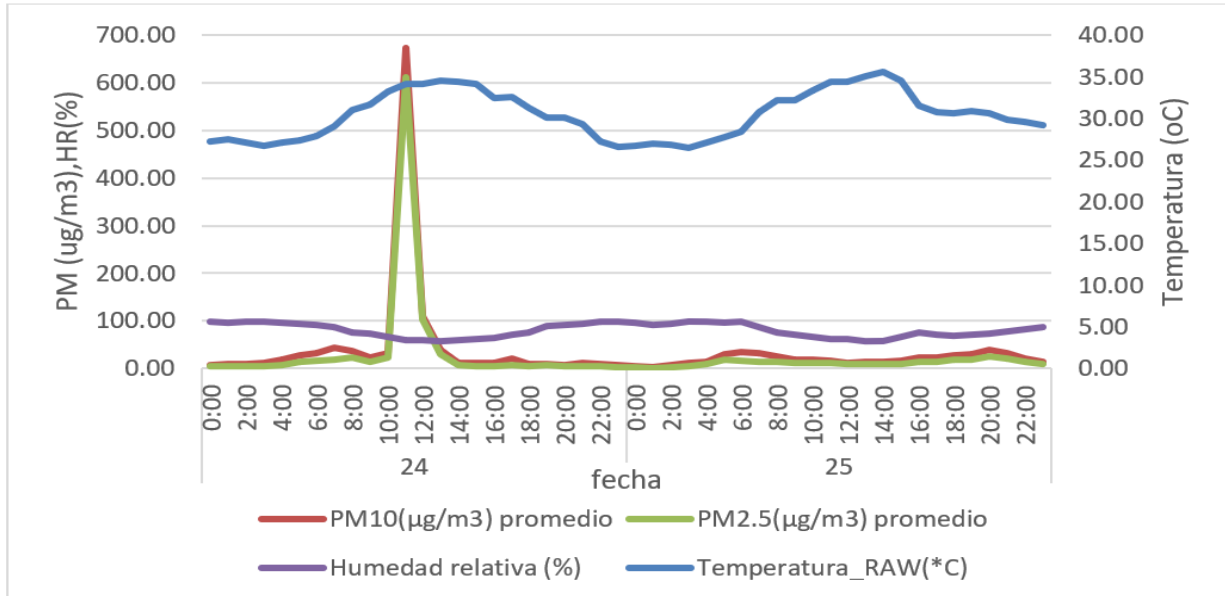
La tabla 6 presenta la estadística descriptiva de las series de tiempo registradas en junio del 2020 en el punto A con el sensor OPCN3 y en julio del 2023 en el punto C con el sensor SDS011.

Tabla 6

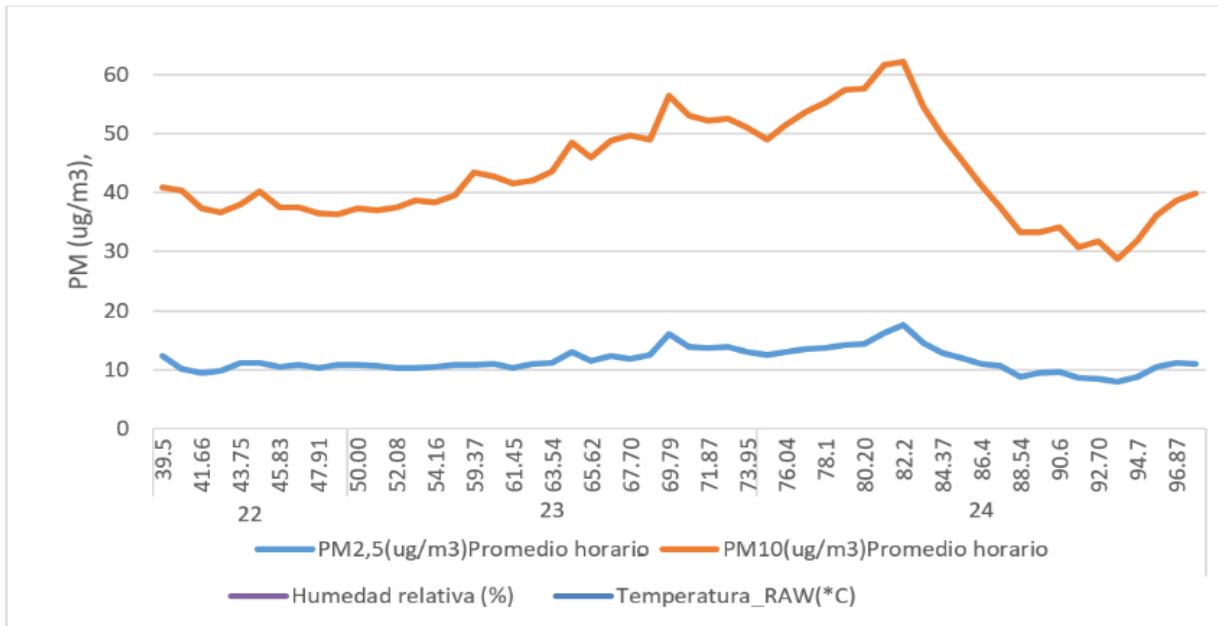
Estadística descriptiva del promedio del muestro de campo en Santa Clara (puntos A y B)

Sistema	Variables	Promedio 1h ±SD	Asimetría	Promedio 24h ±SD	Asimetría
OPC-N3	PM ₁₀	34,409±95,498	6,62	32,402±16,179	-0,02
	PM _{2,5}	25,307±87,856	6,645	23,957±14,813	-0,01
SDSO11	PM ₁₀	43,412±8,407	0,462	44,923±6,804	0,03
	PM _{2,5}	11,61±1,99	0,769	11,91±1,46	0,105

De acuerdo a los resultados de la tabla 6 ambos sensores muestran sensibilidad para medir condiciones atípicas de concentración de material particulado como es evento de intrusión de polvos del Sahara. Los valores obtenidos en los promedios horarios y diarios no superan las concentraciones máximas admisibles según los estándares reportados en este trabajo, pero sus altas desviaciones estándar evidencian la dispersión de los valores y picos elevados que si superan los límites establecidos. En la figura 5a se evidencia mayor afectación de los polvos entre el amanecer (6.00am) y las 13 horas de día 24 de junio. Respecto a la asimetría sólo para el promedio de concentraciones en 24 horas se obtienen valores pequeños pero negativos por lo tanto es sesgo es hacia la izquierda. Las variables meteorológicas tuvieron un comportamiento estable de temperatura y humedad relativa y no hubo lluvias en este muestreo.



a



b

Figura 5

Concentraciones promedio horarias en los puntos A y C con el evento de los polvos del Sahara

4.- CONCLUSIONES

La evaluación de los sensores OPC-N3 y SDS011 en condiciones de campo en un escenario en el periodo lluvioso y de altas temperatura en los meses de junio y julio sin afectación de eventos como la intrusión de los polvos del Sahara y teniendo en cuenta eventos de esta naturaleza demostró la fiabilidad de sus mediciones. Aunque los valores promedios horarios y diarios no superan la norma cubana ni la aprobada por la OMS hay que tener en cuenta que en este trabajo no hubo efecto significativo de otras fuentes por lo que el estudio debe ser profundizado. Este trabajo ayuda a analizar la sensibilidad de estos sensores en condiciones atípicas de concentración de partículas.

La calibración del sensor OPC-N3 con el instrumento de referencia evidencia la factibilidad de uso de este sensor para la medición de PM₁₀. Se debe profundizar este estudio en condiciones de campo dado que la composición de los aerosoles y las variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa pueden sesgar sus mediciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al VLIR-UOS por el apoyo financiero brindado por el proyecto Global Minds BE2017GMHVLHC106 “A low-cost measuring device to directly monitor exhaust gases generated by fuel engines: Design, development, validation”.

REFERENCIAS

1. Alfano B, Barretta L, Giudice A Del, De Vito S, Di Francia G, Esposito E, et al. A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. [cited 2023 May 25]; Available from: www.mdpi.com/journal/sensors
2. Javed W, Wexler AS, Murtaza G, Ahmad HR, Basra SMA. Spatial, temporal and size distribution of particulate matter and its chemical constituents in Faisalabad, Pakistan. *Atmósfera*. 2015 Apr 1;28(2):99–116.
3. Benas N, Beloconi A, Chrysoulakis N. Estimation of urban PM10 concentration, based on MODIS and MERIS/AATSR synergistic observations. *Atmos Environ*. 2013 Nov 1;79:448–54.
4. Navarrete GG, Soto KGR. SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE. *Epistemos*. 2019;13(27):30–7.
5. Li J, Mattewal SK, Patel S, Biswas P. Evaluation of nine low-cost-sensor-based particulate matter monitors. *Aerosol Air Qual Res*. 2020;20(2).
6. Kosmopoulos G, Salamalikis V, Pandis SN, Yannopoulos P, Bloutsos AA, Kazantzidis A. Low-cost sensors for measuring airborne particulate matter: Field evaluation and calibration at a South-Eastern European site. *Sci Total Environ*. 2020 Dec 15;748:141396.
7. Suriano D, Prato M. An Investigation on the Possible Application Areas of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Monitoring. *Sensors* 2023, Vol 23, Page 3976 [Internet]. 2023 Apr 14 [cited 2024 Jan 23];23(8):3976. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/3976/htm>
8. Hernández-Rodríguez E, González-Rivero RA, Schalm O, Martínez A, Hernández L, Alejo-Sánchez D, et al. Reliability Testing of a Low-Cost, Multi-Purpose Arduino-Based Data Logger Deployed in Several Applications Such as Outdoor Air Quality, Human Activity, Motion, and Exhaust Gas Monitoring. *Sensors* 2023, Vol 23, Page 7412 [Internet]. 2023 Aug 25 [cited 2024 Jan 24];23(17):7412. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7412/htm>
9. González Rivero RA, Schalm O, Alvarez Cruz A, Hernández Rodríguez E, Morales Pérez MC, Alejo Sánchez D, et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO₂ Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors. *Atmos* 2023, Vol 14, Page 912 [Internet]. 2023 May 23 [cited 2024 Jan 7];14(6):912. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/6/912/htm>
10. González Rivero RA, Morera Hernández LE, Schalm O, Hernández Rodríguez E, Alejo Sánchez D, Morales Pérez MC, et al. A Low-Cost Calibration Method for Temperature, Relative Humidity, and Carbon Dioxide Sensors Used in Air Quality Monitoring Systems. *Atmosphere (Basel)*. 2023;14(2).
11. Karagulian F, Barbieri M, Kotsev A, Spinelle L, Gerboles M, Lagler F, et al. Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmos* 2019, Vol 10, Page 506 [Internet]. 2019 Aug 29 [cited 2024 Jan

12. Samad A, Mimiaga FEM, Laquai B, Vogt U. Investigating a Low-Cost Dryer Designed for Low-Cost PM Sensors Measuring Ambient Air Quality. *Sensors* 2021, Vol 21, Page 804 [Internet]. 2021 Jan 26 [cited 2024 Jan 7];21(3):804. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/3/804/htm>
13. Masood A, Ahmad K. Data-driven predictive modeling of PM_{2.5} concentrations using machine learning and deep learning techniques: a case study of Delhi, India. *Environ Monit Assess*. 2023 Jan 1;195(1).
14. Tagle M, Rojas F, Reyes F, Vásquez Y, Hallgren F, Lindén J, et al. Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Environ Monit Assess* [Internet]. 2020 Mar 1 [cited 2024 Jan 23];192(3):1–18. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-8118-4>
15. Pope FD, Gatari M, Ng'ang'a D, Poynter A, Blake R. Airborne particulate matter monitoring in Kenya using calibrated low-cost sensors. *Atmos Chem Phys*. 2018;18(20):15403–18.
16. Rodríguez EH, Schalm O, Martínez A. DEVELOPMENT OF A LOW-COST MEASURING SYSTEM FOR THE MONITORING OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS THAT AFFECT AIR QUALITY FOR HUMAN HEALTH. *ITEGAM-JETIA*. 2020;6(22):22–7.
17. Martínez A, Hernández-Rodríguez E, Hernández L, Schalm O, González-Rivero RA, Alejo-Sánchez D. Design of a Low-Cost System for the Measurement of Variables Associated With Air Quality. *IEEE Embed Syst Lett* [Internet]. 2023 Jun 1 [cited 2024 Jan 21];15(2):105–8. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9850363>
18. Hidalgo LEA. Estimación de emisiones gaseosas de fuentes fijas en el sector industrial del cantón Rumiñahui. Quito: UCE; 2014.
19. Alejo D, Morales MC, Ricardo Grau, László Bencs, René Van Grieken, Piet Van Espen & Dismey Sosa, et al. Seasonal trends of atmospheric nitrogen dioxide and sulfur dioxide over North Santa Clara, Cuba. *Environmental monitoring and assessment*. 2012;185.
20. Morera-Gómez Y, Alonso-Hernández CM, Armas-Camejo A, Viera-Ribot O, Morales MC, Alejo D, et al. Pollution monitoring in two urban areas of Cuba by using *Tillandsia recurvata* (L.) L. and top soil samples: Spatial distribution and sources. *Ecol Indic*. 2021 Jul 1;126:107667.
21. Alvarez Cruz A, Morales Pérez MC, González Rivero RA, Núñez Caraballo V. Cuantificación del dióxido de azufre en aire ambiental en zona de protección sanitaria de una recapadora de neumáticos. *Cent Azúcar*. 2022;49:69–79. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_serial&pid=222
22. Sousan S, Koehler K, Hallett L, Peters TM. Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *J Aerosol Sci*. 2017 May 1;107:123–33.
23. Crilley LR, Shaw M, Pound R, Kramer LJ, Price R, Young S, et al. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmos Meas Tech*. 2018 Feb 7;11(2):709–20.
24. NC.1020. Calidad del aire. Contaminantes. Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2014. p. 8–9.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Arianna Alvarez Cruz: Curación de datos, análisis formal, validación –verificación, visualización, redacción – revisión y edición.

Mayra C. Morales Pérez: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, software, supervisión, redacción- borrador original, redacción – revisión y edición

Rosa Amalia González Rivero: Investigación, curación de datos, validación –verificación.

Daniellys Alejo Sánchez: Conceptualización, análisis formal, metodología, administración de proyecto, recursos.

AUTORES

Arianna Alvarez Cruz, graduada de Ingeniería Química en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el año 2021. Profesor Instructor del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química y Farmacia de la UCLV. Estudiante de la Maestría Ingeniería y Saneamiento Ambiental de esta institución. Investiga en temas relacionados con la contaminación atmosférica, específicamente en el monitoreo de contaminantes gaseosos con sensores de bajo costo. aacruz@uclv.cu., ORCID: 0000-0002-5798-6793

Mayra C. Morales Pérez, graduada de Ingeniería Química en la UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el año 1982. Graduado de Doctor en Ciencia técnicas en el año 1993. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química y Farmacia de la UCLV. Miembro del tribunal nacional de doctorados en Ingeniería Química. Tutor de 5 tesis doctorales Ha participado en varios proyectos de investigación relacionadas con la contaminación atmosférica en Cuba y en la universidad y academia Naval de Amberes en Bélgica. mmoralesp@uclv.edu.cu. ORCID:0000-0001-7506-0145

Rosa Amalia González Rivero, Lic. Química (UCLV, 2017), Máster en Seguridad Tecnológica y Ambiental en Procesos Químicos (UCLV, 2022). Estudiante de la Maestría en Ciencias Químicas de la Facultad de Química en la Universidad Nacional Autónoma de México. Investiga en temas relacionados con la calibración de sensores de bajo costo para medir contaminantes del aire y en la cuantificación de gases contaminantes atmosféricos mediante la tecnología DOAS, roagrivero@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6905-4379

Daniellys Alejo Sánchez, Lic. Química (UCLV, 2000). Doctor en Ciencias Químicas (University of Antwerp 2012), Profesora Titular del departamento de Licenciatura en Química de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba. Investiga en temas relacionados con la contaminación del aire y la medición de contaminantes utilizando diferentes técnicas de muestreo y análisis. Actualmente investiga el desarrollo de procedimientos de calibración de sensores de bajo costos para medir contaminantes del aire. daniellysas@uclv.edu.cu, ORCID: 0000-0001-9107-7190

Luis Hernández Santana, graduado de Ingeniería en Automática en la UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba en el año 1981. Graduado de Doctor Ciencias Técnicas en el año 1994. Profesor Titular del Departamento de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Líder científico y fundador del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la UCLV. Ha recibido importantes premios y reconocimientos tanto a nivel nacional como internacional, relacionados con su labor científica. Premio nacional de la Academia de Ciencias de Cuba. Ha dirigido importantes investigaciones en las universidades VUB, KULeuven y la academia Naval de Amberes en Bélgica. luishs@uclv.edu.cu ORCID: 0000-0003-0558-3690

