

Modelo computacional para el análisis de la calidad del aire en interiores

Christian Olvera García¹, José Juan Carbajal Hernández²,
Víctor Manuel Landassuri Moreno¹, Miguel Ángel Olvera García²

¹ Universidad Autónoma del Estado de México,
Centro Universitario del Valle de México,
México

² Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación,
México

{christian.olvera38, landassuri, ma.olvera58}@gmail.com,
jcarbajalh@cic.ipn.mx

Resumen. El presente estudio propone la creación de un modelo computacional para el análisis de la calidad del aire en interiores. Mediante el monitoreo continuo de parámetros como PM₁₀, PM_{2.5}, TVOC, CH₂O, CO₂, temperatura y humedad relativa, se establecen criterios de evaluación de niveles perjudiciales para la salud humana. Asimismo, se establecen los criterios de calidad del aire en interiores que son definidos mediante la conjunción de las evaluaciones de cada parámetro y mismos que corresponden con 5 niveles: excelente, buena, regular, mala y peligrosa calidad.

Palabras clave: Calidad del aire, modelo, sistema, monitoreo.

Computational Model for the Analysis of Indoor Air Quality

Abstract. This study proposes the creation of a computational model for the analysis of indoor air quality. Through the continuous monitoring of parameters such as PM₁₀, PM_{2.5}, TVOC, CH₂O, CO₂, temperature and relative humidity, evaluation criteria are established for levels that are harmful to human health. Likewise, the indoor air quality criteria are established, which are defined by the conjunction of the evaluations of each parameter and which correspond to 5 levels: excellent, good, regular, poor and dangerous quality.

Keywords: Air quality, model, system, monitoring.

1. Introducción

Hoy en día es muy importante la evaluación de la calidad del aire en interiores, en virtud de que se han observado elevados niveles de contaminantes en edificios públicos

como oficinas, escuelas y hospitales [1]. La falta de ventilación en interiores causa una mala calidad del aire y provoca mayor incidencia del síndrome del edificio enfermo [2].

En la Ciudad de México, existen 1717 edificios, todos ellos cerrados y con poca ventilación donde el aire exterior influye dramáticamente sobre el aire interior [3,4].

La falta de mantenimiento a los ductos de ventilación y circulación del aire implica un gasto energético y económico [5]. Esto genera la acumulación de polvo y la creación de gérmenes, bacterias como el *staphylococcus aureus* y ácaros [6,7].

Incluso en los trenes subterráneos se han detectado niveles altos de contaminantes [8,9]. Sin embargo, en México no existe un índice de la calidad del aire interior normativo similar al IMECA, el cual es utilizado para la evaluación de la calidad del aire exterior. Esto hace necesario la implementación de un modelo de evaluación de la calidad del aire interior, que evalúe los niveles de contaminantes perjudiciales.

Sin embargo, debemos señalar que como no existe una norma mexicana (NOM) para los límites máximos permisibles, es necesario utilizar los límites propuestos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) [10], la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) [11] y Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED) [12] para los principales contaminantes del aire interior como las partículas mayores a 2.5 y 10 micras ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), los compuestos orgánicos volátiles (TVOC), el formaldehído (CH_2O) y el dióxido de carbono (CO_2).

Derivado de esto, este trabajo propone la creación de un modelo computacional para la evaluación de la calidad del aire en interiores, tomando como base el índice IMECA y el uso de técnicas de procesamiento digital de señales.

Como resultado se obtiene un indicador capaz de evaluar los 5 parámetros y establecer un nivel correspondiente a la buena o mala calidad del aire en espacios interiores.

2. Materiales y métodos

2.1 Parámetros de la calidad del aire

De acuerdo con la literatura, diversos organismos han dado seguimiento a la evaluación de la calidad del aire en interiores, estableciendo los materiales tóxicos en casas y edificios como son: los humos de tabaco, las partículas de materia de 10 y 2.5 micrómetros, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, formaldehído, radón, fibras de asbesto, fungicidas, pesticidas, etc. Sin embargo, para estandarizar los contaminantes que existen en los lugares cerrados.

Se utilizaron los límites máximos permisibles propuestos por la USEPA, la ASHRAE y la LEED [13] para los principales contaminantes, como son: PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 , CH_2O , TVOC's. Además, debemos señalar los principales daños a la salud que provocan cada uno de los contaminantes, como a continuación se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Importancia de los parámetros de calidad del aire en el organismo humano.

Parámetro	Importancia
PM ₁₀	Estas partículas se sedimentan en las vías respiratorias superiores, dando origen y penetran a los alvéolos pulmonares, causando el agravamiento de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, ya que pueden desencadenar efectos carcinógenos.
PM _{2.5}	Estas partículas pueden penetrar las vías respiratorias inferiores, causando diversas enfermedades de tipo respiratorio, como la bronquitis, y más recientemente se ha demostrado sus efectos sobre las enfermedades de tipo cardiovascular.
TVOC's	Estos compuestos orgánicos al ser inhalados se adhieren a los tejidos grasos y no pueden disolverse en nuestro organismo. Por tanto, estos pasan al torrente sanguíneo y se acumulan en diversos órganos del cuerpo y ponen en riesgo la vida, sobre todo en las mujeres embarazadas ya que afecta directamente al feto en el desarrollo embrionario.
CH ₂ O	El formaldehído en niveles bajos puede producir irritación a la piel, los ojos, la nariz y la garganta. Sin embargo, si se llega a beber grandes cantidades de formaldehído puede causar un profundo dolor, vómitos, coma, y posiblemente la muerte.
CO ₂	Puede afectar la función respiratoria y provocar excitación seguida por depresión del sistema nervioso central.

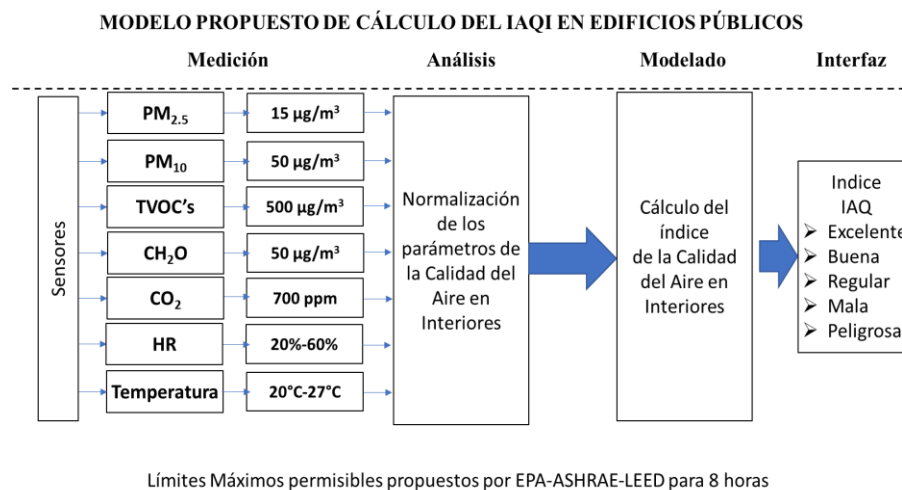


Fig.1. Arquitectura del sistema de monitoreo de la calidad del aire en interiores.

2.2 Modelo de la evaluación de la calidad del aire en interiores

El Modelo de Evaluación de la Calidad del Aire consta de 4 fases: medición, análisis, modelado y finalmente la interfaz de usuario que muestra el cálculo del Índice de Calidad del Aire en Interiores (IAQ) [14]. La fase de medición consta de un módulo de 7 sensores correspondientes a los parámetros necesarios para analizar la calidad del aire. En la fase de análisis, los niveles obtenidos son clasificados de acuerdo con los límites máximos permisibles.

En la fase de modelado los valores obtenidos son evaluados para obtener el índice de calidad del aire. En la última fase, la Interfaz gráfica muestra la clasificación y

Tabla 2. Intervalos de concentración para asignación de niveles de calidad del aire.

IQA	PM _{2.5} [µg/m ³]	PM ₁₀ [µg/m ³]	TVOC's [µg/m ³]	CH ₂ O [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]
0-50	0-7.5	0-25	0-250	0-25	0-350
51-100	7.6-15.2	26-50	251-500	26-50	351-700
101-150	15.1-22.5	51-75	501-750	51-75	701-1050
151-200	22.6-30.0	76-100.0	751-1000	76-100.0	1051-1400
>200	>30.0	>100.0	>1000	>100.0	>1400

resultados de las mediciones y calidad del aire obtenido. A continuación, en la Fig.1 se detalla el modelo de cálculo para la evaluación de la calidad del aire en interiores.

2.3 Sistema de monitoreo de la calidad del aire en interiores

a) Aspectos generales

Para la implementación del modelo de la calidad del aire en lugares cerrados, es necesario conocer los límites máximos permisibles y tiempos de exposición a los contaminantes. Sin embargo, debemos mencionar que en México no se han establecido las Normas Oficiales para evaluación de la calidad del aire en interiores. Por tanto, para proponer un modelo que permita evaluar la calidad del aire en interiores, se utilizaron los límites máximos propuestos por la USEPA, la ASHRAE y la LEED. Estas instituciones definen los límites máximos permisibles para los principales contaminantes del aire interior. Los límites máximos propuestos son: 15µg/m³ para las PM_{2.5}, 50 µg/m³ para las PM₁₀, 500µg/m³ para el TVOC's, 50 µg/m³.para el CH₂O, 700 ppm para el CO₂. Finalmente hay que comentar que la temperatura se estableció entre 20.3°C - 23.3°C en invierno y 23.9°C - 26.9°C en verano. La humedad relativa se estableció entre el 30% y 50%. Con estos límites máximos permisible se establece la fase de medición de los parámetros.

Además, para implementar la fase de la Interfaz de usuario, se establecieron 5 niveles de calidad del aire en interiores como son: excelente (0-50), buena (51-100), regular (101-150), mala (151-200) y peligrosa (>200) de acuerdo con la normalización utilizada en el índice IMECA como se muestra en la Tabla 2.

Cada parámetro es medido con una frecuencia de muestreo de 15 minutos. Sin embargo, en ocasiones las mediciones pueden perderse por diferentes cuestiones. Para obtener una base de datos consistente es necesario tener todo el conjunto de mediciones acorde a la frecuencia de muestreo, por lo que una interpolación lineal permitirá restaurar aquellos datos faltantes acorde con la siguiente expresión:

$$s = s_1 + (t - t_1) \frac{(s_2 - s_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (1)$$

donde s refiere a la concentración por calcular. Las mediciones se muestran por cada hora, por lo que antes de evaluar cada parámetro, es necesario realizar un promedio móvil de la siguiente forma:

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n s(t-1). \quad (2)$$

Para implementar la fase de análisis se hará la normalización de los valores se realiza mediante la aplicación de las fórmulas de forma similar a las utilizadas en la normalización del índice IMECA, como se detalla a continuación.

Indicador para partículas menores a 2.5 micras ($PM_{2.5}$):

$$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * \frac{100}{15}. \quad (3)$$

Indicador para partículas menores a 10 micras (PM_{10}):

$$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{100}{50}. \quad (4)$$

Indicador para compuestos orgánicos volátiles (TVOC):

$$I[TVOC] = C[TVOC] * \frac{100}{500}. \quad (5)$$

Indicador para formaldehído (CH_2O):

$$I[CH_2O] = C[CH_2O] * \frac{100}{50}. \quad (6)$$

Indicador para dióxido de carbono (CO_2):

$$I[CO_2] = C[CO_2] * \frac{100}{700}. \quad (7)$$

Finalmente, para implementar la fase de modelado hacemos el cálculo de la calidad del aire se puede definir como:

$$IAQ = \max\{I[PM_{2.5}], I[PM_{10}], I[TVOC's], I[CH_2O], I[CO_2]\}. \quad (8)$$

3. Resultados

3.1 Adquisición de datos

Para la evaluación del modelo, se obtuvieron un total de 7056 datos, correspondiente a una semana de medición. 6 datos por hora, y un dato por cada parámetro. Además, debemos señalar que, para obtener el dato de cada parámetro por hora, fue necesario

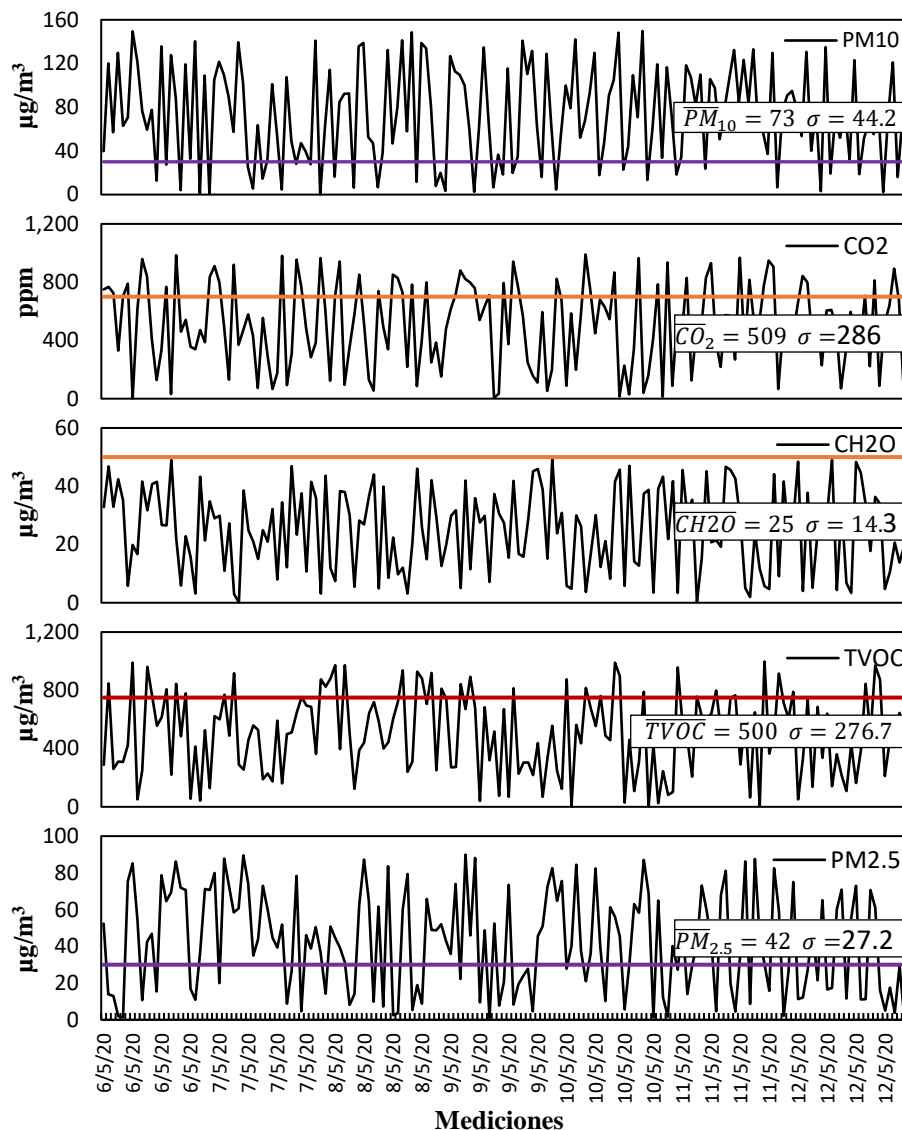


Fig. 2. Conjunto de mediciones de parámetros de la calidad del aire al interior durante una semana de mediciones.

tomar 6 muestras de cada parámetro a cada 10 minutos y obtener el promedio de las mediciones para evaluar el dato a cada hora durante los 7 días de la semana.

Obteniendo una base de datos con 168 datos por parámetro a cada hora y con un total de 1,176 datos. Para efectos de graficar los datos de manera representativa sólo se muestran 24 datos de un día en cada gráfico.

La arquitectura del sistema está basada en un módulo de sensores MoreSunsDIY, permite medir $PM_{2.5}$, PM_{10} , TVOC's, CH_2O , CO_2 , Temperatura y Humedad Relativa.

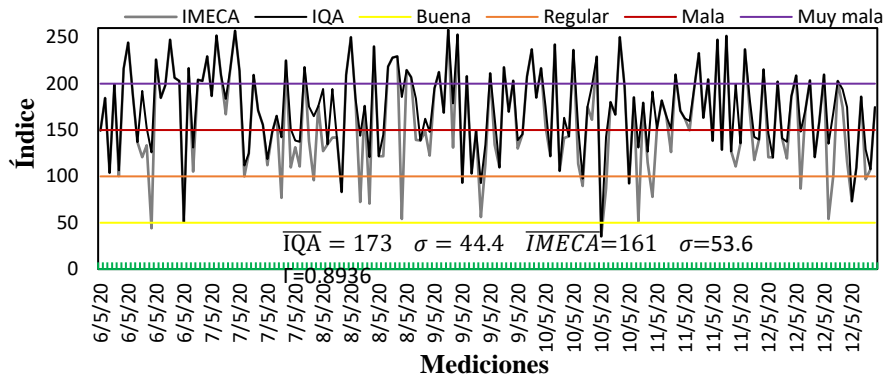


Fig. 3. Evaluación y comparación de la calidad del aire en interiores empleando el índice propuesto y el IMECA.

La medición de parámetros se obtiene con rangos de error de $PM_{2.5}$ ($\pm 10\%$), PM_{10} ($\pm 10\%$), $TVOC$'s ($\pm 7\%$), CH_2O ($\pm 8\%$), CO_2 ($\pm 2\%$), Temperatura ($\pm 1\%$) y Humedad Relativa ($\pm 3\%$). Por los rangos de error, este es un sistema confiable para el monitoreo de la calidad del aire. Cuenta con una la interfaz FT232R USB que utiliza el protocolo UART con 5 volts de alimentación para hacer la conexión a la computadora, Mediante la Interfaz VISA de National Instruments es posible leer los datos mediante la configuración de un puerto serial a 9600 baudios, bit de paro, sin paridad y sin control de flujo de datos.

3.2 Análisis de parámetros

En la Fig. 2 se puede observar el conjunto de datos medidos durante un día. En términos generales podemos observar que el parámetro CH_2O es el que muestra valores más aceptables en un rango de *buena*, CO_2 se presenta niveles de *regular*, $TVOC$ *malo* y PM_{10} con $PM_{2.5}$ niveles *peligrosos*. Estos estados permiten deducir que el resultado de la calidad del aire presentara estados peligrosos para la salud humana.

3.3 Evaluación de la calidad del aire

En la Fig. 3 se puede observar los resultados de la evaluación del índice IAQ y la comparación contra el índice IMECA. En este caso se puede observar algunas diferencias con el IMECA, debido a que éste último solo considera tres de los 5 parámetros involucrados, mismo que a su vez muestra algunas diferencias en la evaluación, en donde valores menos penalizados se obtienen debido a la falta de las evaluaciones en los parámetros faltantes. De esa forma, se generan evaluaciones que podrían ser catalogadas como de buena calidad del aire, cuando en las evaluaciones del IAQ se observa lo contrario.

En la Fig. 3 se puede observar el conjunto de datos medidos durante la semana de prueba y sus respectivas evaluaciones del IAQ, pudiendo observar claramente el comportamiento del IAQ esta por encima de los 150 puntos por tanto la calidad del aire fue mala durante el periodo de prueba. resultante.

4. Conclusiones

El presente trabajo pretende sentar las bases para mejorar la calidad del aire en edificios cerrados, en donde reciben grandes concentraciones de CO₂, PM_{2.5} y PM₁₀. Actualmente, los esfuerzos por notificar acerca del estado de la calidad del aire se enfocan a exteriores, en donde se proponen programas de reducción de movilidad automotriz como método de contingencia. Sin embargo, para interiores aún hace falta mucho trabajo y difusión para generar normas y procedimientos que permitan mejorar las condiciones de salud en espacios cerrados. Las direcciones futuras en esta área de investigación estarán enfocadas a estudiar parámetros adicionales que intervienen en la calidad del aire al interior.

Referencias

1. Aserea, L., Mols, T., Blumberg, A.: Assessment of indoor air quality in renovated buildings of Liepja municipality. *Energy Procedia*, 91, pp. 907–915 (2016)
2. Thach, T.Q., Mahirah, D., Dunleavy, G., Nazeha, N., Zhang, Y., Hui-Tan, C., Roberts, A.C., Christopoulos, G., Soh, C.K., Car, J.: Prevalence of sick building syndrome and its association with perceived indoor environmental quality in an Asian multi-ethnic working population. *Building and Environment*, 166, pp. 106420 (2019)
3. Meier, R., Schindler, C., Eeftens, M., Aguilera, I., Ducret-Stich, R.E.: Modeling indoor air pollution of outdoor origin in homes of Sapaldia subjects in Switzerland. *Environment International*, 82, pp. 85–91 (2015)
4. Hwang Sung Ho, Seo Sung Chul, Yoo Young, Ki Yeon Kim, Choung Ji Tae, Park Wha Me: Indoor air quality of daycare centers in Seoul, Korea. *Building and Environment*, 124, pp. 186–193 (2017)
5. Renaud-Salis, L.C., Abadie, M., Wargocki, P., Rode, C.: Towards the definition of indicators for assessment of indoor air quality and energy performance in low-energy residential buildings. *Energy and Buildings*, 152, pp. 492–502 (2017)
6. Asif, A., Zeeshan, M., Hashmi, I., Zahid, U., Faraz-Bhatti, M.: Microbial quality assessment of indoor air in a large hospital building during winter and spring seasons. *Building and Environment*, 135, pp. 68–73 (2018)
7. Hernández-Castillo, O., Mugica-Álvarez, V., Castañeda-Briones, M.T., Murcia, J.M., García-Franco, F., Briseño, Y.F.: Aerobiological study in the Mexico City subway system. *Aerobiología*, 30, pp. 357–367 (2014)
8. Bin Xu, Jinliang Hao: Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review. *Environment International*, 107, pp. 33–46 (2017)
9. Mugica-Álvarez, V., Figueroa-Lara, J., Romero-Romo, M., Sepúlveda-Sánchez, J., López-Moreno, T.: Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system. *Atmosphere Environment*, 49, pp. 284–293 (2012)
10. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA): Indoor Air Quality (IAQ). <https://epa.gov/indoor-air-quality-iaq> (2020)
11. Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE): Indoor air quality guide. <https://ashrae.org/technical-resources/bookstore/indoor-air-quality-guide> (2020)
12. Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED): What indoor air quality parameters do you need to know?. <https://iotacommunications.com/blog/indoor-air-quality-parameters/> (2020)

13. Phillips, H., Handy, R., Sleeth, D., Thiese, M.S., Schaefer, C., Stubbs, J.: Taking the “LEED” in indoor air quality: Does certification result in healthier buildings?. *Journal of Green Building*, 15 (3), pp. 55–66 (2020)
14. Li, H., You, S., Zhang, H., Zheng, W., Zheng, X., Jia, J., Ye T., Zou, L.: Modelling of AQI related to building space heating energy demand based on big data analytics. *Applied Energy*, 203, pp. 57–71 (2017)