

Modelo de evaluación de la calidad del aire interior empleado el proceso analítico jerárquico

Miguel Angel Olvera-García, José Juan Carbajal-Hernández,
Gabriel de Jesús Rodríguez-Jordán

Instituto Politécnico Nacional,
Centro de Investigación en Computación,
México

ma.olvera58@gmail.com, jcarbajalh@cic.ipn.mx,
gabrielrodriguezj@hotmail.com

Resumen. La contaminación del aire interior es un problema común en las grandes ciudades del mundo. Varios gobiernos han emitido normas para evaluar los parámetros del aire interior. En zonas con alta densidad de población, las personas permanecen confinadas en hogares y oficinas por períodos prolongados, respirando el aire interior sin saber cómo está la contaminación del entorno. Este artículo presenta un modelo de evaluación que utiliza el Análisis de Procesos Jerárquicos (AHP) utilizando dos factores de evaluación: uno que evalúa el nivel de toxicidad de los contaminantes del aire interior (TF) y otro que evalúa el confort de la habitación (CF). Finalmente, se calculó la suma de ambos factores para obtener un índice de calidad del aire interior (HIAQI). Los parámetros ambientales utilizados en este índice incluyen partículas finas (PM1), (PM2.5) y (PM10), compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC), ozono (O3) y monóxido de carbono (CO) para el factor TF y nitrógeno dióxido (NO2), dióxido de azufre (SO2), formaldehído (CH2O), dióxido de carbono (CO2), temperatura (TEMP) y humedad relativa (RH) para el factor CF. Según la toxicidad o el nivel de confort, se calculan los pesos individuales de cada contaminante, teniendo una valoración precisa en el cálculo de la calidad del aire interior. Finalmente, el modelo propuesto considera seis etapas de puntuación: excelente, buena, regular, mala, muy mala y peligrosa. Los resultados se compararon contra otros índices de la literatura, mostrando un excelente desempeño del HIAQI en comparación con los índices propuestos en la literatura mundial, proporcionando mejores evaluaciones cuando se asignaron pesos de jerarquía de acuerdo con la importancia de cada parámetro, dentro de la contaminación del aire interior.

Palabras clave. Calidad del aire, interior, sistema de inferencia difusa, proceso analítico jerárquico.

Indoor Air Quality Assessment Model Using the Hierarchical Analytical Process

Abstract. Indoor air pollution is a common problem in large cities around the world. Several governments have issued standards to evaluate indoor air parameters. In areas with high population density, people remain confined to homes and offices for long periods, breathing indoor air without knowing what the pollution in the

environment is like. This article presents an evaluation model that uses Hierarchical Process Analysis (AHP) using two evaluation factors: one that evaluates the level of toxicity of indoor air pollutants (TF) and another that evaluates room comfort (CF). Finally, the sum of both factors was calculated to obtain an indoor air quality index (HIAQI). The environmental parameters used in this index include fine particles (PM1), (PM2.5) and (PM10), total volatile organic compounds (TVOC), ozone (O3) and carbon monoxide (CO) for the TF factor and nitrogen dioxide (NO2), sulfur dioxide (SO2), formaldehyde (CH2O), carbon dioxide (CO2), temperature (TEMP) and relative humidity (RH) for the CF factor. Depending on the toxicity or comfort level, the individual weights of each pollutant are calculated, having a precise assessment in the calculation of indoor air quality. Finally, the proposed model considers six scoring stages: excellent, good, average, bad, very bad and dangerous. The results were compared against other indices in the literature, showing an excellent performance of the HIAQI in comparison with the indices proposed in the world literature, providing better evaluations when hierarchy weights were assigned according to the importance of each parameter, within the indoor air pollution.

Keywords: Air quality, indoor, fuzzy inference system, analytic hierarchy process.

1. Introducción

La contaminación del aire interior es un problema de salud para la población de las grandes ciudades del mundo [1]. También, se han observado grandes niveles de contaminantes dentro de las estaciones de metro [2], incluso en las zonas rurales donde se quema madera y otros biocombustibles para cocinar y calentar agua para el aseo personal [3]. La pandemia provocó que millones de personas estuvieran confinadas en sus hogares, respirando el aire interior por períodos prolongados, afectando en algunos casos el rendimiento de las personas debido al síndrome del edificio enfermo [4]. Esta situación hace necesario vigilar la calidad del aire interior ya que, actualmente, esta actividad no está normalizada.

Por otro lado, el seguimiento de la calidad del aire exterior se ha estandarizado en todo el mundo. Sin embargo, muy pocos gobiernos en el mundo han emitido normas para evaluar los parámetros del aire interior. Además, dentro de la literatura mundial se han propuesto diversos modelos de evaluación de la calidad del aire interior [5], [6], [7]. El modelo de Saad se realiza por la normalización de los parámetros y presenta valores altos. El modelo Dionova sólo analiza 8 parámetros, mientras que el modelo propuesto analiza 12 parámetros. Los modelos de Saad y Dionova no consideran el grado de toxicidad de los contaminantes ni dan prioridad a los contaminantes críticos del aire interior.

De la misma manera, Dionova no revisa las PM10 en su análisis, y Saad, en su análisis, no considera las PM2,5. Además, el modelo de Rickenbacker es muy novedoso debido a que incluye contaminantes como PM0.5, PM1 y PM5 que son contaminantes donde aún no existen en el mercado sensores para monitorear estas partículas. Desafortunadamente, no establece los promedios anuales de estas partículas, ni detalla el método para evaluar los 13 contaminantes que enumera. Los límites máximos permisibles de los doce contaminantes evaluados por el Índice Jerárquico de la Calidad del Aire Interior (Hierarchical Indoor Air Quality Index HIAQI) se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de contaminantes HIAQI.

Units	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	TVOC	CH ₂ O	O ₃	CO	NO ₂	SO ₂	CO ₂	TEM	RH
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$										ppm	
HIAQI	8	15	50	500	50	0.06	9	0.08	0.08	700	20-25	40-70

Por otro lado, algunas agencias especializadas que han emitido regulaciones para regular el aire exterior se han preocupado por emitir algunas regulaciones para el aire interior. Como la Agencia de Protección Ambiental [8], el Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong [9] y la Guía de Calidad del Aire Interior de Singapur [10], la Administración Americana de Seguridad y Salud Ocupacional [11], la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno [12] y el Departamento de Salud y Seguridad Ocupacional de Malasia [13].

1.1. Contribución

El modelo propone una mejora a los modelos propuestos por Saad y Dionova y otros de la literatura, utilizando la normalización de parámetros que se complementa con el análisis de procesos jerárquicos.

1.2. Hipótesis

Mediante un modelo computacional que utilice la normalización de parámetros y el análisis de procesos jerárquicos se puede hacer el monitoreo del aire interior que permita establecer los momentos críticos de contaminación del aire interior, para emitir las alertas que permitan advertir e los usuarios para abrir las ventanas, así como a los sistemas de control automático para activar los ventiladores. El modelo consta del análisis de 12 contaminantes del aire interior agrupados en dos factores. Un factor de toxicidad de los contaminantes y otro factor de confort de la habitación.

2. Métodos y materiales

2.1. Modelo de medición de calidad del aire interior

Para asignar un peso prioritario a cada parámetro, primero se deben normalizar las concentraciones de los contaminantes con base en los límites máximos permisibles y la escala de la USEPA que va de [0-500] puntos [14]. Donde 0 es una concentración no tóxica y 1 es cuando la escala es de 500 puntos, suponiendo una calidad del aire interior contaminado. Una vez normalizada la concentración, se asignará un peso de jerarquía para afinar la evaluación. Este proceso se puede observar en la Fig. 1.

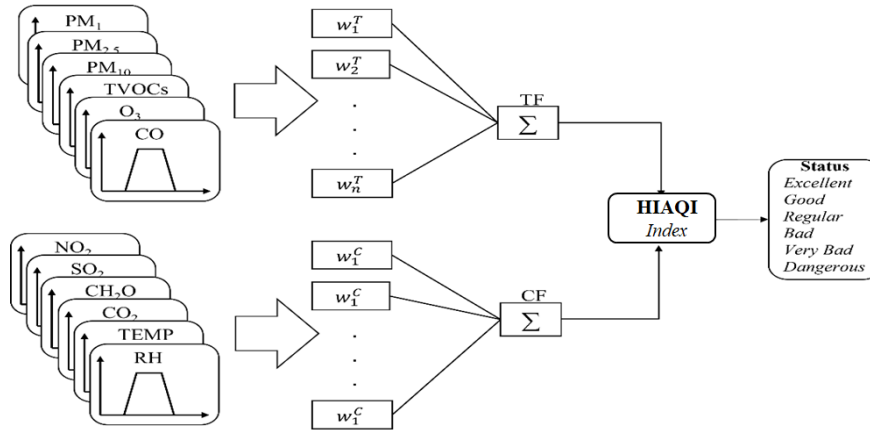


Fig. 1. Arquitectura del modelo HIAQI utilizando dos modelos TF y CF.

2.2. Normalización de parámetros

Para normalizar cada parámetro, se utilizaron las fórmulas de estandarización del factor TF que se muestran en las fórmulas (1) al (6). Esto permitió transformar las concentraciones en un escalero dentro de un rango de 0 a 500 puntos:

$$I[PM_1] = C[PM_1] * \frac{100}{8} \text{ para cualquier concentración,} \quad (1)$$

$$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * \frac{100}{15} \text{ para cualquier concentración,} \quad (2)$$

$$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{100}{50} \text{ para cualquier concentración,} \quad (3)$$

$$I[TVOCs] = C[TVOCs] * \frac{100}{500} \text{ para cualquier concentración,} \quad (4)$$

$$I[O_3] = C[O_3] * \frac{100}{0.06} \text{ para cualquier concentración,} \quad (5)$$

$$I[CO] = C[CO] * \frac{100}{9} \text{ para cualquier concentración.} \quad (6)$$

Fórmulas de estandarización de parámetros del factor TF.

También se utilizaron las fórmulas de estandarización del factor CF que se muestran en las fórmulas (7) al (12). Esto permitió transformar las concentraciones en un escalero que va de 0 a 500 puntos. También hay que señalar que en ambos casos las concentraciones son demasiado altas. La estandarización de parámetros permite superar los límites de escala:

$$I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{100}{0.08} \text{ para cualquier concentración,} \quad (7)$$

$$I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{100}{0.08} \text{ para cualquier concentración,} \quad (8)$$

$$I[CH_2O] = C[CH_2O] * \frac{100}{50} \text{ para cualquier concentración,} \quad (9)$$

$$I[CO_2] = C[CO_2] * \frac{100}{700} \text{ para cualquier concentración,} \quad (10)$$

$$I[TEMP] = C[TEMP] * \frac{100}{25} \text{ para cualquier concentración,} \quad (11)$$

$$I[RH] = C[RH] * \frac{100}{40} \text{ para cualquier concentración.} \quad (12)$$

Fórmulas de estandarización de parámetros del factor CF.

Las ecuaciones (13) y (14) según sea el caso y de acuerdo con la Fig. 1 para asignar los pesos de ponderación, donde w es el peso seleccionado del parámetro de cada factor TF o CF. Cuando dos o más salidas tengan el mismo valor de puntuación, se utilizará el peso de mayor prioridad de la siguiente manera:

$$TF = I[PM1] * w_1 + I[PM2.5] * w_2 + I[PM10] * w_3 + I[TVOCs] * w_4 + I[O3] * w_5 + I[CO] * w_6, \quad (13)$$

$$CF = I[NO2] * w_1 + I[SO2] * w_2 + I[CH2O] * w_3 + I[CO2] * w_4 + I[TEMP] * w_5 + I[RH] * w_6. \quad (14)$$

2.3. Índice de calidad del aire interior

Después de normalizar las concentraciones de los doce contaminantes de los factores TF y CF con una escala de 0 a 500 puntos para obtener el índice de calidad del aire con el análisis de procesos jerárquicos (HIAQI). Éste se calculó mediante la suma vectorial de los factores TF y CF, y el resultado es un escalar que varía de 0 a los 500 puntos. Finalmente, una vez obtenidos los escalares de los factores TF y CF, ambos escalares se integran en una única escala de salida de rango de 0 a 500 puntos que describe seis etapas de puntuación como son: *excelente, bueno, regular, malo, muy malo y peligroso*.

Aplicando la jerarquía a los contaminantes más tóxicos y diferenciando la importancia al momento de calcular cada factor. Esta suma garantiza que el puntaje obtenido no sea mayor que la escala final. Ya que las diferentes subescalas proporcionan una interpretación completa del estado de HIAQI, como son: excelente [0 - 50], bueno (51 - 100), regular (101 - 150), malo (151 - 200), muy malo (201 - 300) y peligroso [301 - 500). La expresión (15) se debe usar para obtener el HIAQI:

$$HIAQI = \frac{\sqrt{TF^2 + CF^2}}{1.4143}. \quad (15)$$

2.4. Análisis de procesos jerárquicos (AHP)

El análisis de procesos jerárquicos (AHP) propuesto por Thomas L. Saaty [14] es un método que permite transformar e interpretar los niveles de una jerarquía de los contaminantes en pesos matemáticos que permitirán ajustar la salida del sistema. Los pesos utilizados en el AHP afectan el resultado de la evaluación según el parámetro más

Tabla 2. Interpretación de la escala de importancia según Saaty.

Scale	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Importance	Equal	Weak	Moderate	Moderate+	Strong	Strong+	Very Strong	Very Strong+	Extreme
TF	CO	O ₃		TVOCS		PM ₁₀		PM _{2.5}	PM ₁
CF	RH	TEMP		CO ₂		CH ₂ O		SO ₂	NO ₂

crítico, proporcionando una evaluación más consistente [15]. La Tabla 2 proporciona un orden de prioridad para cada contaminante en una escala de importancia.

Los niveles de importancia se eligieron en función de los requisitos de la calidad del aire interior para la salud humana. Las comparaciones de las relaciones entre los parámetros (PR) del factor TF se pueden describir de la siguiente manera:

PR1: PM₁ tiene una débil importancia sobre las PM_{2.5} porque PM₁ ingresa al torrente sanguíneo y afecta a todo el cuerpo, mientras que PM_{2.5} afecta a los pulmones.

PR2: Las PM₁ tienen una importancia moderada sobre las PM₁₀ porque las PM₁₀ afectan sólo a la garganta, la faringe y la laringe.

PR3: PM₁ es muy importante sobre los TVOC porque los TVOC afectan a los tejidos grasos, principalmente en mujeres embarazadas porque pueden afectar al feto.

PR4: PM₁ tiene una importancia muy fuerte sobre el O₃ porque los efectos del O₃ afectan a los tejidos vivos y están asociados con algunas enfermedades.

PR5: Las PM₁ son de extrema importancia sobre el CO porque el CO sólo en altas concentraciones y durante períodos prolongados pueden causar la muerte.

Según el parámetro CF, las relaciones de comparación se pueden describir como:

PR1: El NO₂ tiene una débil importancia sobre el SO₂ porque el NO₂ corroe los tejidos afecta e irrita las vías respiratorias, y el SO₂ irrita los ojos, la garganta y las vías respiratorias.

PR2: El NO₂ tiene una importancia moderada sobre el CH₂O porque el CH₂O produce irritación en la nariz, garganta y los ojos.

PR3: El NO₂ es muy importante sobre el CO₂ porque el CO₂ afecta solo a la función respiratoria.

PR4: El NO₂ tiene una importancia muy fuerte sobre la TEMP porque las altas TEMP afectan la respiración y el ritmo cardíaco.

PR5: El NO₂ es de extrema importancia sobre la RH porque la RH causa irritación ocular y efectos en las vías respiratorias.

2.5. Cálculo de pesos

Para transformar los niveles de jerarquía en pesos según la prioridad de los contaminantes. Es decir, hacer la comparación por pares. Donde los valores de importancia asignados a cada parámetro se utilizaron para desarrollar una matriz definida positiva,

Tabla 3. Matriz de comparación de pares del factor TF.

	PM ₁	PM ₂₅	PM ₁₀	TVOCS	O ₃	CO	
	1	9/8	9/7	9/5	9/3	9	
	8/9	1	8/7	8/5	8/3	8	
A _{TF} =	7/9	7/8	1	7/5	7/3	7	(3)
	5/9	5/8	5/7	1	5/3	5	
	3/9	3/8	3/7	3/5	1	3	
	1/9	1/8	1/7	1/5	1/3	1	

Tabla 4. Matriz de comparación de pares del factor CF.

	NO ₂	SO ₂	CH ₂ O	CO ₂	TEMP	RH	
	1	9/8	9/7	9/5	9/3	9	
	8/9	1	8/7	8/5	8/3	8	
A _{CF} =	7/9	7/8	1	7/5	7/3	7	(4)
	5/9	5/8	5/7	1	5/3	5	
	3/9	3/8	3/7	3/5	1	3	
	1/9	1/8	1/7	1/5	1/3	1	

consistente y recíproca de $[n \times n]$ cuyos elementos satisfacen el $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$, para i, j y $k = 1, \dots, n$. Este par también se puede representar de la siguiente manera:

$$A = \begin{matrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

donde W_i es la escala de importancia del parámetro (P), según los valores de la escala de Saaty y asignados en las relaciones anteriores (PR) y reemplazados en la ecuación 16. Para este caso se construyeron dos matrices correspondientes a los factores TF y CF como se muestra en las tablas (3, 4).

Las matrices cuadradas A y B se calculan mediante la siguiente expresión:

$$B = A \times A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

La suma de las filas se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_i = \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

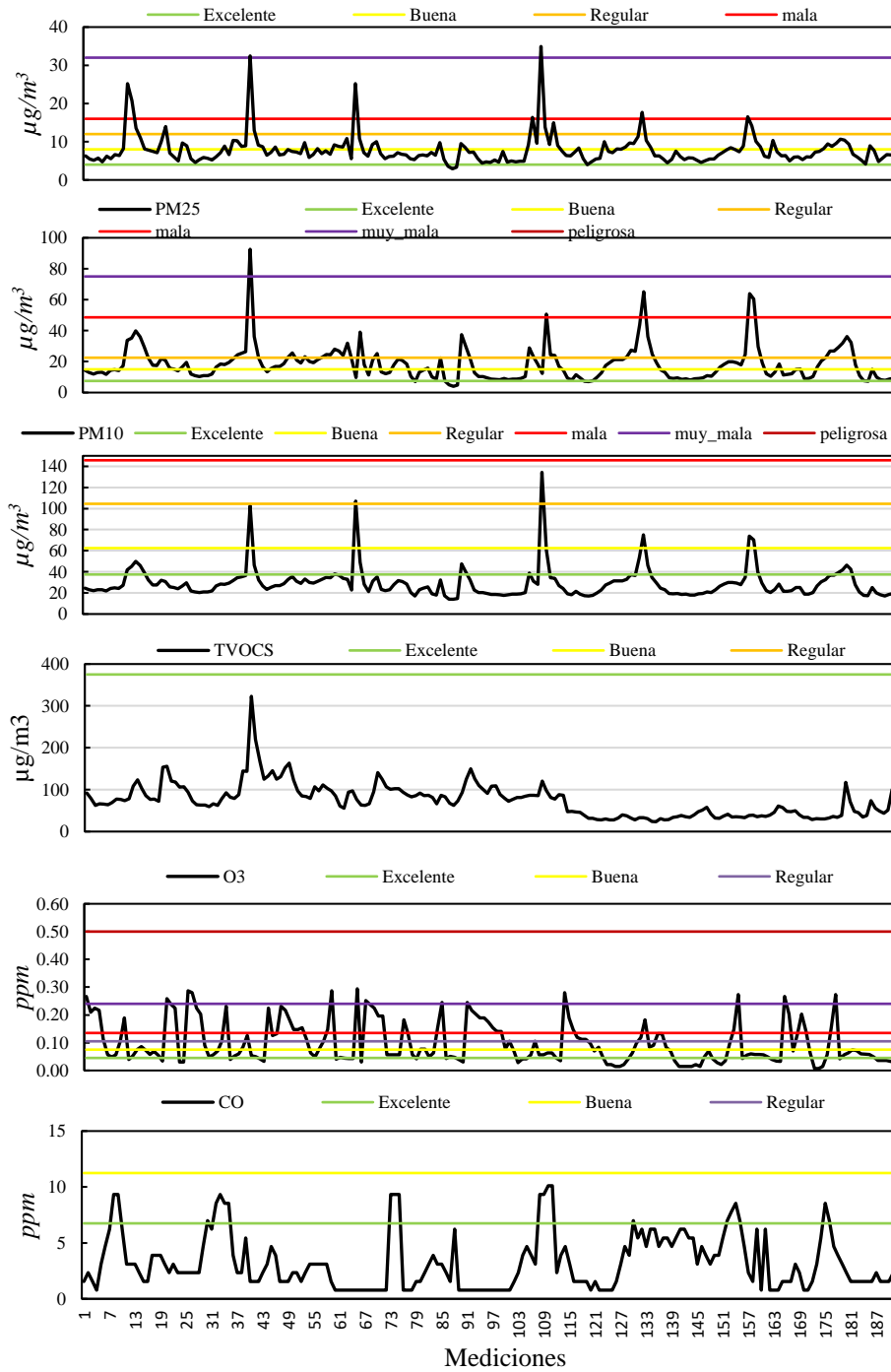


Fig. 2. Variación diaria de los contaminantes del factor TF (1 al 8 de julio de 2022).

Tabla 5. Índice de consistencia aleatoria RI.

Matrix Size (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

Posteriormente, los pesos de prioridad se obtienen normalizando el Vector C_i de la siguiente manera:

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

donde w_i es el vector de pesos, el resultado se conoce como el vector propio que fue propuesto por Perron [17]. Este proceso se debe repetir hasta que la solución del vector propio no cambie respecto a la iteración anterior. Los pesos de ponderación determinados de cada contaminante se calculan de la siguiente manera:

$$w^{TF} = \begin{bmatrix} PM_1 \\ PM_{2.5} \\ PM_{10} \\ TVOC's \\ O_3 \\ CO \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.27536 \\ 0.24477 \\ 0.20994 \\ 0.14996 \\ 0.08999 \\ 0.02999 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$w^{CF} = \begin{bmatrix} NO_2 \\ SO_2 \\ CH_2O \\ CO_2 \\ TEMP \\ HR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.27536 \\ 0.24477 \\ 0.20994 \\ 0.14996 \\ 0.08999 \\ 0.02999 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

Finalmente, el radio de consistencia (CR) de las matrices A_{TF} y A_{CF} deberán calcularse usando la siguiente expresión:

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)RI}, \quad (22)$$

donde λ_{max} son los valores más adecuados de las matrices de comparación de pares, n es el tamaño de la matriz y RI es el índice de consistencia aleatoria que, según la Tabla 5, es 1,25. En este caso, las matrices de comparación de pares deberán de tener un rango de consistencia (CR) máxima del 10%. Por tanto, el CR obtenido es del 1% (0.01), lo que significa que es aceptable.

3. Resultados

3.1. Análisis del factor toxicológico

Para mostrar el comportamiento diario de los parámetros de calidad del aire interior, la Fig. 2 muestra una semana de mediciones (del 1 al 8 de julio de 2022), donde se obtuvieron las evaluaciones a cada hora mediante el promedio móvil de las concentraciones de los parámetros. Se puede ver que diariamente por la tarde, las PM_1 , $PM_{2.5}$ y O_3 exceden el nivel muy malo (la línea roja) de los 200 puntos. Sin embargo, durante todo el año, se

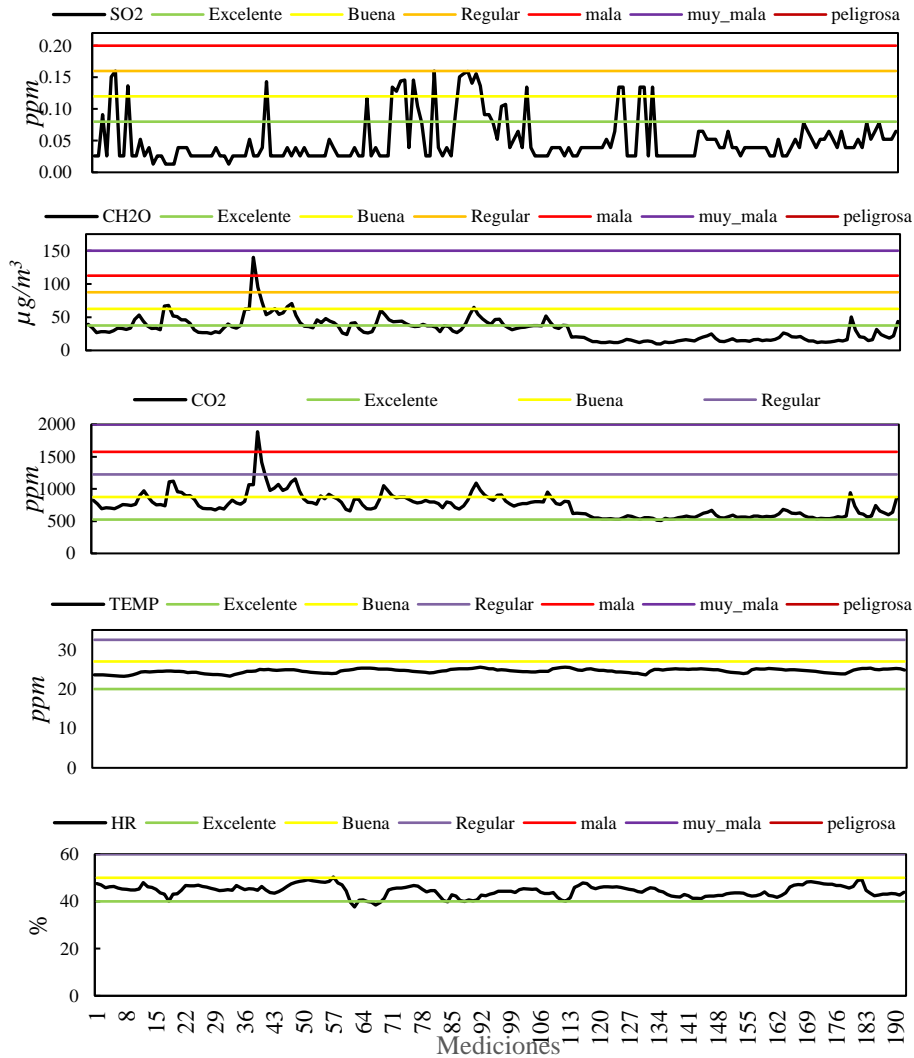


Fig. 3. Variación diaria de los contaminantes del factor CF (1 al 8 de julio de 2022).

observó que estos tres contaminantes excedieron considerablemente los 150 puntos ya que, de los 8760 registros de todo el año, 2,845, 5145 y 2441 evaluaciones, respectivamente, rebasan los 150 puntos. Mientras que los TVOC no exceden la línea verde de 50 puntos.

3.2. Análisis del factor de confort CF

Similar al análisis del factor TF, los comportamientos de los parámetros de CF observados en la Fig. 3, de una semana de concentraciones (del 1 al 8 de julio de 2022),

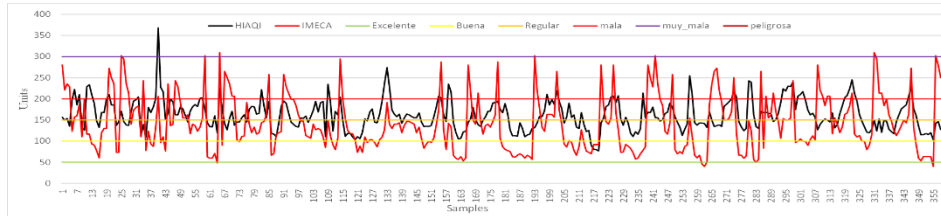


Fig. 4. Comparación entre el HIAQI el IMECA.

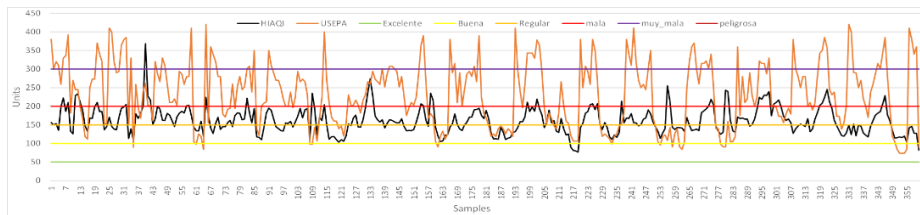


Fig. 5. Comparación entre el HIAQI el USEPA.

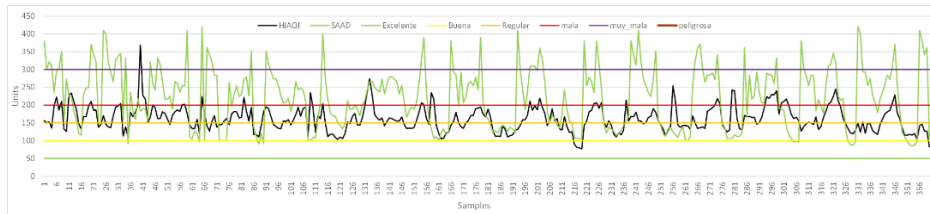


Fig. 6. Comparación entre el HIAQI y Saad.

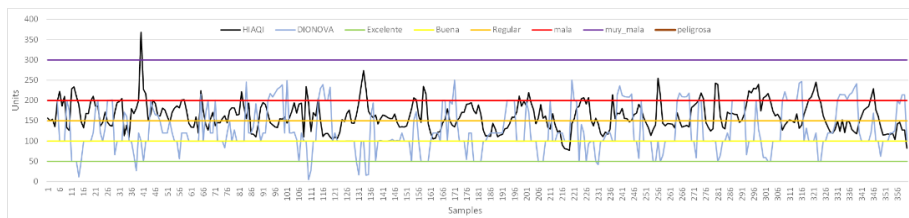


Fig. 7. Comparación entre el HIAQI y Dionova.

se observó que NO_2 , SO_2 , CH_2O y CO_2 excedieron la línea naranja del nivel regular de los 150 puntos y esa misma tendencia se mantiene durante todo el año ya que de las 8760 evaluaciones (4,885, 1,136, 3,414 y 4,844 evaluaciones respectivamente). En contraste, TEMP y RH nunca alcanzaron la línea roja del nivel malo de 200 puntos.

3.3. Evaluaciones de calidad del aire interior

Para verificar la eficiencia del modelo HIAQI se comparó con otros modelos propuestos y se realizó un análisis exhaustivo del rendimiento de HIAQI. En este sentido, se hizo una comparación utilizando otros índices. Las metodologías para la estandarización de parámetros propuestos por las agencias gubernamentales del aire exterior, como IMECA

Tabla 6. Comparación numérica de los diferentes índices de la calidad del aire interior.

No	Date	Pollutants								Indoor Air Quality Indexes								
		PM1	PM25	PM10	TVOCs	O3	CO	NO2	SO2	CH2O	CO2	TEMP	HR	IMECA	USEPA	HIAQI	SAAD	DIONOVA
1	2022/07/15/T0000	4	7	17	55	0.154	1.56	0.133	0.078	23	652	25.3	44.7	162	220	128	226	219
2	2022/07/15/T0100	3	7	17	45	0.140	1.56	0.133	0.078	19	610	24.9	45.0	147	200	122	207	232
3	2022/07/15/T0200	3	7	17	43	0.119	2.33	0.147	0.052	18	601	24.8	45.0	125	170	118	179	241
4	2022/07/15/T0300	5	9	19	39	0.056	2.33	0.238	0.052	17	583	24.6	45.2	113	238	146	219	122
5	2022/07/15/T0400	6	14	24	41	0.021	2.33	0.259	0.065	17	589	24.7	45.3	123	259	161	237	100
6	2022/07/15/T0500	6	15	25	42	0.007	6.22	0.287	0.078	18	597	24.7	45.2	137	287	176	261	100
7	2022/07/15/T0600	6	15	25	38	0.014	7.78	0.315	0.065	16	576	24.5	45.3	150	315	181	285	100
8	2022/07/15/T0700	7	20	30	54	0.056	8.56	0.301	0.052	23	650	24.4	46.5	143	301	186	273	100
9	2022/07/15/T0800	8	21	31	41	0.140	8.56	0.343	0.052	17	590	24.5	45.4	163	343	206	309	120
10	2022/07/15/T0900	6	19	29	37	0.259	7.78	0.385	0.078	16	575	25.0	44.8	273	385	229	371	169
11	2022/07/15/T1000	8	21	31	42	0.035	3.89	0.28	0.052	18	598	24.8	46.2	133	280	177	255	100
12	2022/07/15/T1100	8	22	32	43	0.049	2.33	0.196	0.078	18	602	25.2	45.3	93	196	161	184	100
13	2022/07/15/T1200	9	23	33	41	0.057	0.78	0.119	0.052	18	594	25.4	43.0	60	119	136	122	62
14	2022/07/15/T1300	7	20	30	42	0.051	0.78	0.105	0.026	18	596	25.6	43.0	54	105	115	112	100
15	2022/07/15/T1400	7	22	32	45	0.048	7.00	0.084	0.026	19	611	25.4	43.2	64	84	115	97	100
16	2022/07/15/T1500	7	23	33	57	0.043	7.00	0.07	0.026	25	665	25.7	46.7	64	74	118	88	100
17	2022/07/15/T1600	7	20	30	79	0.041	7.00	0.056	0.039	34	764	25.6	46.7	64	74	116	85	120
18	2022/07/15/T1700	8	20	30	75	0.039	7.00	0.07	0.039	32	745	25.6	46.0	64	74	120	88	120
19	2022/07/15/T1800	5	13	23	76	0.033	0.78	0.084	0.026	33	753	25.2	46.2	40	84	104	96	126
20	2022/07/15/T1900	7	14	24	69	0.287	0.78	0.105	0.026	30	720	25.1	46.5	302	410	142	410	200
21	2022/07/15/T2000	9	15	25	61	0.266	1.56	0.119	0.026	26	681	25.2	46.0	280	380	146	381	192
22	2022/07/15/T2100	5	10	20	57	0.238	1.56	0.126	0.026	25	665	25.1	45.9	251	340	127	342	214
23	2022/07/15/T2200	6	10	20	57	0.252	1.56	0.119	0.026	24	663	24.8	46.5	265	360	127	361	214
24	2022/07/15/T2300	6	11	21	57	0.063	0.78	0.007	0.039	24	664	25.0	46.5	66	90	82	108	100

Tabla 7. Comparación de los límites máximos permisibles de los diferentes índices.

	PM 1	PM ₂ 5	PM ₁₀ 0	TVOC S	CH ₂ O	C O ₃	NO O ₂	SO ₂	CO ₂	TEM P	RH
INDICES	µg/m ³								ppm	°C	%
IMECA		45	95			0.11	11	1	0.1		
USEPA		35.4	154			0.07	9.4	8	0.1		
SAAD			150	841		0.05	8.7	8	100	0	40-100
DIONOVA									102		40-100
A		150		967		0.55	8.5	0.2	0	18-45	100
HIAQI	8	15	50	500	50	0.06	9	8	8	700	20-25 40-70

y USEPA. También se comparó con los modelos propuestos en la literatura, como Dionova y Saad. Modelos por normalización de parámetros como Saad, y otros desarrollados por un sistema de inferencia difusa (FIS) como Dionova. En la Tabla 6 se muestra un día de evaluaciones y comparaciones numéricas utilizando los siete índices revisados.

Para comprender mejor las diferencias significativas que hay entre los índices de evaluación, debemos observar que la principal razón de estas diferencias es que los límites máximos permitidos de los contaminantes, el número de contaminantes que cada índice evalúa sin considerar su modelo. Se hicieron comparaciones contra otros índices como el IMECA y USEPA para evaluar la calidad del aire exterior, así como a los seis contaminantes. Al mismo tiempo, los modelos Saad y Dionova evalúan ocho contaminantes.

Finalmente, el HIAQI analiza doce parámetros para realizar su evaluación. La Tabla 7 muestra los límites máximos permitidos de los contaminantes que fueron evaluados por cada uno de los métodos.

La Fig. 4 compara el HIAQI contra el IMECA que realizan las evaluaciones por normalización de los parámetros del 1 al 15 de julio de 2022. En este caso, el IMECA presentó una evaluación más alta que la del HIAQI, ya que el IMECA presentó evaluaciones que están por encima de los 200 puntos, Y en algunos puntos críticos, están por cercanos a los 300 puntos. Mientras que el HIAQI permaneció entre los 200 y los 300 puntos y rara vez excedió la línea morada de los 300 puntos.

La Fig. 5 compara el HIAQI contra el USEPA que realizan las evaluaciones por la normalización de los parámetros del 1 al 15 de julio de 2022. En este caso, el USEPA presentaron evaluaciones más altas que las del HIAQI, ya que mientras las evaluaciones del HIAQI están entre los 200 y los 300 puntos, Y en algunos puntos críticos, supera los 300 puntos. Mientras que el USEPA realizó evaluaciones entre los 300 y 400 puntos, y solo en algunos puntos críticos supera los 400 puntos.

La Fig. 6 compara el HIAQI contra el Saad donde el modelo de Saad realiza sus evaluaciones mediante la normalización de los parámetros. en el periodo del 1 al 15 de julio de 2022. El modelo Saad presentó las evaluaciones más altas que están por encima de los 300 puntos; y en algunos momentos críticos, superaron los 400 puntos. En contraste, HIAQI están entre los 200 y los 300 puntos, Y en algunos puntos críticos, supera los 300 puntos. Debido al sesgo prioritario del AHP que recompensa la evaluación.

La Fig. 7 compara el HIAQI contra el modelo de Dionova que realiza sus evaluaciones a través de un sistema de inferencia difusa en el periodo del 1 al 15 de julio de 2022. El modelo de Dionova tuvo evaluaciones más bajas que las del HIAQI, ya que siempre permaneció por debajo de los 200 puntos y solo en algunos casos excedió la línea roja. En contraste, el HIAQI permaneció entre los 200 y los 300 puntos y rara vez excedió la línea morada de los 300 puntos en algunos casos. Debido al sesgo prioritario del AHP que recompensa la evaluación.

4. Discusión

Las frecuencias de los siete puntajes de los índices se observaron utilizando un año de datos desde el uno de julio de 2022 hasta los treinta de junio de 2023. En este caso, IMECA, USEPA, Saad, Dionova e HIAQI. Con promedios de 106, 184, 181, 113 y 172 puntos respectivamente.

Los modelos por normalización de parámetros (IMECA, USEPA, y Saad). Los datos tienen una tendencia similar a una distribución normal, pero sus promedios son cercanos a los 200 puntos. Asimismo, el modelo implementado por un sistema de inferencia difusos fue el Dionova. Pero debemos señalar que este modelo no tiene una tendencia similar a una distribución normal porque el modelo Dionova tiene 3023 evaluaciones con un rango de [91-99] puntos.

Mientras tanto, el modelo HIAQI, presentan sus datos con una tendencia similar a una distribución normal, pero su promedio es cercano a los 170 puntos. Por lo tanto, decidir cuál es el mejor modelo de evaluación de calidad del aire interior no es fácil. Sin embargo, el modelo HIAQI es una buena opción para evaluar la calidad del aire interior, ya que,

desde los 156 puntos, puede emitir alertas tempranas necesarias para advertir a los habitantes y recircular el aire interior en momentos críticos.

Además, los modelos que fueron implementados por la normalización de parámetros presentaron promedios más altos que los modelos por inferencia difusa (FIS), como el modelo de Dionova y el HIAQI, tuvieron promedios de 113 y 172 unidades. Pero las principales diferencias entre los modelos debemos mencionar que, aunque en los métodos por normalización de los parámetros (IMECA, USEPA HIAQI y Saad), la distribución de las evaluaciones es muy similar a una distribución normal, con rangos [98-107, 160-174, 161-174, 97-112] puntos, respectivamente.

Sin embargo, las evaluaciones de FIS, como el modelo DIONOVA tiene 3023 evaluaciones con un rango de [91-99] puntos. Esto exhibe una falla aparente del modelo porque solo tiene 16 reglas de inferencia difusa; Cuando se requieren cientos de reglas (incluso miles) para simular la realidad, ya que al aumentar el número de reglas mejora la simulación de la realidad y reduce el número de fallos. Sin embargo, el HIAQI supera por mucho al modelo de Dionova. Contra el resto de los modelos, podemos ver que el promedio de Saad, y USEPA tienen evaluaciones altas, cerca de los 200 puntos, mientras que el HIAQI están cerca de los 170 puntos.

Por tanto, podemos concluir que la evaluación de los modelos mediante la normalización de los parámetros, excepto el IMECA (USEPA, y Saad) presentó altas evaluaciones con puntajes superiores a los 200 puntos (35.9%, y 31.1% de las evaluaciones, respectivamente). Por el contrario, los modelos implementados por FIS como el Dionova solo tuvieron el 18.5% de las evaluaciones con puntajes superiores a los 200 puntos. Mientras que HIAQI tuvo el 32.8% de las evaluaciones con puntajes superiores a los 200 puntos.

En conclusión, debemos comentar que el modelo propuesto HIAQI es una buena opción para evaluar la calidad del aire interior porque va desde los 156 puntos, puede emitir alertas tempranas necesarias para advertir a los habitantes y a los dispositivos de aire acondicionado automático para recircular el aire interior en situaciones críticas.

5. Conclusiones

Este trabajo creó un nuevo modelo de evaluación de calidad del aire interior para proteger a la salud humana en las grandes ciudades y áreas urbanas. El modelo se creó de acuerdo con la dinámica y la distribución de los contaminantes del aire interior en un ambiente cerrado. El modelo HIAQI logra el objetivo principal de emitir alertas tempranas, ya que, desde los 156 puntos de la escala, puede advertir a los habitantes, así como a los mecanismos de control de aire acondicionado automático para recircular el aire interior en situaciones críticas.

Referencias

1. Kabele, K., Veverková, Z., Urban, M.: Methodology for assessing the indoor environmental quality in low energy buildings in the Czechia. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 609, no. 4, p. 042103 (2019) doi: 10.1088/1757-899X/609/4/042103
2. Xu, B., Hao, J.: Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review. Environment International, vol. 107, pp. 33–46 (2017) doi: 10.1016/j.envint.2017.06.016
3. Weaver, A. M., Gurley, E. S., Crabtree-Ide, C., Salje, H., Yoo, E. H., Mu, L., Akter, N., Ram,

- P. K.: Air pollution dispersion from biomass stoves to neighboring homes in Mirpur, Dhaka, Bangladesh. *BMC Public Health*, vol. 19, no. 425, pp 1–12 (2019) doi: 10.1186/s12889-019-6751-z
4. Sarkhosh, M., Najafpoor, A. A., Alidadi, H., Shamsara, J., Amiri, H., Andrea, T., Kariminejad, F.: Indoor air quality associations with sick building syndrome: An application of decision tree technology. *Building and Environment*, vol. 188, pp. 107446 (2021) doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107446
 5. Rickenbacker, H. J., Collinge, W. O., Hasik, V., Bilec, M. M.: Indoor air quality assessments of diverse buildings in an energy conservation district from a life cycle assessment lens: Short paper. In: *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Built Environments*, pp. 207–210 (2016) doi: 10.1145/2993422.2993424
 6. Saad, S. M., Shakaff, A. Y. M., Saad, A. R. M., Yusof, A. M., Andrew, A. M., Zakaria, A., Adom, A. H.: Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index. In: *AIP Conference Proceedings*, vol. 1808, no. 1 (2017) doi: 10.1063/1.4975276
 7. Dionova, B. W., Mohammed, M. N., Al-Zubaidi, S., Yusuf, E.: Environment indoor air quality assessment using fuzzy inference system. *ICT Express*, vol. 6, no. 3, pp. 185–194 (2020) doi: 10.1016/j.icte.2020.05.007
 8. New Jersey Department of Environmental Protection: 2018 air quality index (2018) USEPA.aqi-technical-assistance-document-sept2018 <https://www.airnow.gov/publications/air-quality-index/technical-assistance-document-for-reporting-the-daily-aqi/>
 9. HKEPD: A guide on indoor air quality certification scheme for offices and public places indoor air quality management group. (2003). <https://www.iaq.gov.hk/wp-content/uploads/2021/04/certguide-eng.pdf>
 10. SIAQG: Guidelines for good indoor air quality in office premises (1996) <https://www.nlb.gov.sg/biblio/203971917>
 11. OSHA: Indoor air quality in commercial and institutional buildings (2011) <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3430indoor-air-quality-sm.pdf>
 12. ACGIH: TLVs ® and BEIs ® based on the documentation of the ® defining the science of occupational and environmental health ® threshold limit values for chemical substances and physical agents biological exposure indices (2019) <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/>
 13. DOSH: Industry code of practice on chemicals classification and hazard communication (2014) <https://www.dosh.gov.my/index.php/legislation/codes-of-practice/chemical-management/3460-industry-code-of-practice-on-chemicals-classification-and-hazard-communication-amendment-2019-part-1/file>
 14. Zadeh, L. A.: Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 3–28 (1978) 10.1016/0165-0114(78)90029-5
 15. Saaty, T. L.: Decision making the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 13, pp. 1–35 (2004) doi: 10.1007/s11518-006-0151-5
 16. Olvera-García, M. A., Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P., Hernández-Bautista, I.: Air quality assessment using a weighted fuzzy inference system. *Ecological Informatics*, vol. 33, pp. 57–74 (2016) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.04.005>
 17. Perron, O.: Zur theorie der matrices. *Mathematische Annalen*, vol. 64, no. 2, pp. 248–263 (1907) doi: 10.1007/BF01449896