

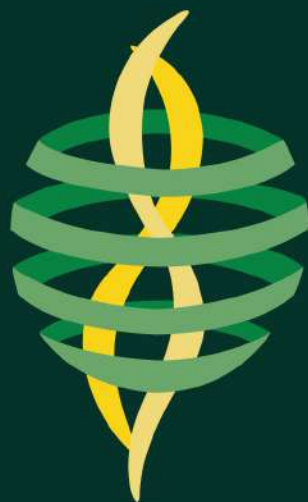
RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TÍTULO No. 04-2018-070614032000-203

VIGENCIA 20/06/2020 A 06/07/2021

ACTUALIZACIÓN 06/07/2021

ISSN 2594-1925

a cargo de la FCITEC



# RECIT

## REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS

VOLUMEN 4 CAPÍTULO 3

ISSN: 2594-1925



**FCITEC**

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología  
Unidad Valle de las Palmas

# 2021

Julio-Septiembre



# Confort lumínico interior y desempeño termo-energético para edificio no-residencial en clima cálido seco extremo

## *Indoor light comfort and energy performance for non-residential building in extreme hot dry climate*

Santibáñez-Halphen Ana-Sofía , Luna-León Anibal , Bojórquez-Morales Gonzalo 

Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Bulevar Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México

**Autor de correspondencia:** Santibáñez Halphen Ana Sofía, Maestría en Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Bulevar Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México. E-mail: [ssantibanez@uabc.edu.mx](mailto:ssantibanez@uabc.edu.mx). ORCID: [0000-0002-3321-1774](https://orcid.org/0000-0002-3321-1774).

**Recibido:** 13 de Febrero del 2021

**Aceptado:** 17 de Julio del 2021

**Publicado:** 27 de Agosto del 2021

**Resumen.** – Los efectos de iluminación natural en espacios interiores tienen una notable influencia sobre el ambiente de la edificación, pero más aún, en el bienestar del usuario. El objetivo de este estudio fue analizar la iluminación natural y el cumplimiento del rango de iluminación de 300 lux que la NOM-025-STPS-2008 establece como óptimo, mismo que estándares internacionales consideran como mínimo. Se realizó un diagnóstico ambiental y termo-energético a partir del simulador *Design Builder*, se analizó una oficina del sector privado situada en clima cálido seco extremo, así mismo, se estudiaron cinco escenarios de cielo distintos: un día de cielo nublado y cuatro días representativos de cielo claro. El análisis para identificar la iluminación natural se determinó a partir del Factor Luz Día expresado en lux. Se establecieron deficiencias o excesos de calidad de iluminación a partir de los resultados del caso base, además, se simuló otros nueve escenarios con diferentes sistemas de acristalamiento con el fin de analizar los efectos sobre ganancias de calor. Las propiedades del material que permiten un mejor comportamiento térmico y lumínico son aquellos con menor coeficiente por ganancias de calor solar y mayor coeficiente visible térmico. El mejor sistema de acristalamiento se encuentra con un doble ultra claro, al mantener la iluminación solo 5% por debajo que el caso base y disminuir el 18% las ganancias de calor por acristalamiento. La mejor condición termo-energética fue con un vidrio sencillo tinte azul turquesa ya que a pesar de disminuir en 25% la iluminación, permitió cumplir con la norma mexicana y disminuir en 55% las ganancias de calor. Se requiere continuar el estudio y modificar la relación ventana-suelo y ventana-muro, así como la forma y ubicación del vano para establecer si realmente el vidrio sencillo tintado es mejor que los sistemas de acristalamiento doble.

**Palabras clave:** Confort lumínico interior; Factor Luz Día; Desempeño termo-energético; Clima cálido seco extremo; Edificio no residencial.

**Abstract.** - The effects of daylight in interior spaces have a significant influence on the environment of the building, but even more, on the well-being of the user. The objective of this study was to analyze natural lighting and compliance with the range of 300 lux that NOM-025-STPS-2008 establishes as optimal, the same as international standards consider as a minimum. An environmental and energy diagnosis was carried out using the Design Builder simulator, a private sector office located in an extreme dry hot climate was analyzed, five different sky scenarios were studied: one day with cloudy sky and four representative days with clear skies. The analysis to identify natural lighting was determined from the Daylight Factor expressed in lux. Lighting quality deficiencies or excesses were established from the results of the base case, in addition, another nine scenarios were simulated with different glazing systems to analyze the effects on heat gains. The properties of the material that allow a better thermal and light behavior are those with the lowest coefficient for solar heat gains and the highest coefficient for visible thermal light. The best glazing system is found with a double ultra-clear glass, by keeping the lighting only 5% lower than the base case and decreasing the heat gains per glazing by 18%. The best thermo-energetic condition was with a simple turquoise-blue tinted glass, since despite reducing the lighting by 25%, it allowed to comply with the Mexican standard and reduce heat gains by 55%. It is necessary to continue the study and modify the window-floor and window-wall ratio, as well as the shape and location of the opening to establish whether single tinted glass is better than double glazing systems.

**Keywords:** Indoor light quality; Daylight Factor; Energy performance; Extreme hot dry climate; Non-residential building.



## 1. Introducción

La iluminación natural en la edificación tiene un efecto positivo a la salud física y mental del usuario [1], [2]; en el ámbito laboral, estos beneficios pueden mejorar la productividad del trabajador al disminuir tensión, ansiedad, síntomas de claustrofobia y mejorar su estado de ánimo [2], [3], [4].

Distintos estudios [5], [6], [7] destacan el impacto significativo que el diseño de envolventes tiene en el ambiente interior; sin embargo, muchos edificios no incorporan medidas que propician un ambiente iluminado naturalmente [8], por lo que es necesario considerar sistemas artificiales para lograr una buena calidad de iluminación.

Actualmente el diseño y construcción de edificios sustentables [9], tiene entre sus prioridades disminuir el consumo energético de la edificación [10] por lo que optimizar las condiciones del espacio al implementar medidas que propicien la iluminación natural, permitirá un mejor ambiente interior [10], [11] y, a su vez, mejorar el desempeño energético del mismo [12].

La literatura enfatiza que los aspectos que afectan principalmente la calidad de iluminación natural interior son: el diseño de envolventes y su distribución espacial [5], [6], también especifica que se deben de tomar en cuenta factores como la geometría del espacio [13], reflectancia de muros y techos [14], tamaño y ubicación de vanos [15], tipo de acristalamiento y marcos para ventanas [16], [17], sistemas pasivos y activos de sombreado [18], [19], [20], entre otros [21]; destaca que el adecuado manejo de estos factores resultará en una conexión entre el usuario y naturaleza [3]. Sin embargo, las ventanas pueden afectar significativamente el comportamiento térmico del espacio [22], ya que para algunos

edificios puede representar el 50% del calor a retirar por sistemas de climatización [23].

Los fundamentos de la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés), detallan tres relaciones principales para la optimización de elementos traslucidos y opacos en la envolvente, el primero por las propiedades de los sistemas de acristalamiento, a través de la diferencia de calor causada por la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, el intercambio de radiación solar y la fuga de aire; el segundo, por la relación ventana-muro (V-M), definido como la relación entre el área de acristalamiento y el área de muro; y por último, por la relación de área de acristalamiento y el área de suelo (V-S) [24].

Algunos investigadores consideran esta relación (V-S) como la clave para la correcta iluminación [2], [25] y la eficiencia energética [26], [27], ya que si la iluminación natural es deficiente, se requerirá de iluminación artificial lo que generará un consumo eléctrico mayor [12], sin embargo, cada espacio debe analizarse para determinar la mejor posición, configuración y tamaño de la ventana; los vanos ubicados en la parte superior del muro incrementan los niveles de iluminación natural, mientras que la forma rectangular horizontal permiten vistas al exterior, pero, aquellas de forma rectangular vertical permiten una distribución más uniforme de iluminación natural en espacios donde el área de suelo es pequeña [28].

Para climas cálido secos, Shaeri et al., [23] aseveran que en fachadas norte y sur una relación V-M de 20%-40% permite una buena calidad de iluminación y mantiene ganancias internas bajas, ya que, si es mayor, el consumo eléctrico por climatización incrementa exponencialmente. En



el caso de fachadas este y oeste, se recomienda un V-M del 50%; sin embargo, en general, con una relación V-S mayor al 10% se podrá aprovechar de forma eficiente la luz natural dentro del espacio, por lo que una relación V-M de 20% será lo ideal para reducir el consumo energético por ganancias de calor y obtener iluminación natural eficiente, principalmente en fachada oeste, debido a sus altas ganancias por radiación solar durante la tarde.

### 1.1 Normatividad para iluminación natural interior

Una de las principales herramientas regulatorias que se utiliza en México para impulsar la eficiencia energética son las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), ya que son obligatorias y establecen características técnicas para equipos, materiales y especificaciones para espacios interiores [29], así pues la NOM-024-ENER-2012 establece características térmicas y óptimas para sistemas de acristalamiento en edificaciones[30]; NOM-030-ENER-2016, para la eficiencia energética mediante lámparas led [31]; NOM-035-STPS-2018, establece factores de riesgo psicosocial para propiciar el bienestar del trabajador [32]; y la NOM-025-STPS-2008, establece requerimientos de iluminación que propician un ambiente saludable para los trabajadores[33].

Además, hay otras normas para edificación encaminadas a la sustentabilidad, pero se usan como sistema de evaluación y no de aplicación obligatoria para diseñar y construir. No obstante se basan en normatividad internacional, principalmente aquellas emitidas por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) [34] y la ASHRAE [35], además, el Consejo de la Construcción Sostenible de los Estados Unidos (USGBC, por sus siglas en inglés) y el IWB, también juegan un rol importante al definir características que

propician la eficiencia energética, bienestar al usuario y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la Certificación en Energía y Diseño Ambiental (LEED) [36] y la Certificación para el Bienestar (WELL) [1].

### 1.2 Simulación termo-energética

En espacios interiores, la disponibilidad de luz natural depende de la cantidad de radiación solar incidente en una superficie dada según su orientación, para poder determinarla se le atribuyen aspectos como luz directa del sol, luz directa del cielo y luz reflejada en las superficies aledañas; así pues diversos autores [37], [38] hacen referencia al Factor Luz Diurna (FLD) como un método eficiente para definir este parámetro ya que describe la iluminación natural medida en un punto situado normalmente al centro de un plano determinado.

La simulación térmica, energética y de iluminación se lleva a cabo por medio de programas computacionales cada vez más avanzados[39]. El programa *Design Builder* utiliza el motor de cálculo de *EnergyPlus* para evaluar con precisión diversos aspectos que afectan el desempeño ambiental y termo-energético de los edificios[40]; permite dos tipos de informe de simulación para iluminación natural, el primero mediante un mapa de luz diurna que expresa los niveles de luz natural en lux (lx) y FLD. El segundo informe, permite analizar los datos en una tabla con valores numéricos.

El adecuado uso de iluminación natural en oficinas es favorable[12] ya que se produce un efecto positivo en la productividad y bienestar de los empleados[6], [19], además, al reducir el uso de iluminación artificial, se logra una eficiencia energética en las edificaciones [41], [42], [43] lo que puede aumentar la plusvalía del mismo [8]; sin embargo, tras revisar la literatura, se encontró



que en la mayoría de los casos, se analiza en términos de iluminación natural sin tomar en cuenta las ganancias térmicas por acristalamiento. Por otro lado, aquellos estudios que correlacionan las variables están situados en climas templados o fríos, más no en cálido seco extremosos.

El presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre la adecuada iluminación natural en el espacio interior y las repercusiones hacia el desempeño termo-energético de un edificio no-residencial, situado en un clima cálido seco extremo, para establecer así, sistemas de acristalamiento que permitan ganancias de iluminación natural sin aumentar las ganancias de calor por ventanas.

El análisis de iluminación por simulación para identificar la calidad de iluminación natural se determina a partir del FLD y su equivalente en lx. Se busca cumplir el rango de iluminación que la NOM-025 establece como mínimo de 300 lx, mismo que el USGBC y IWB establecen como mínimo a cumplir en al menos 55% del área de suelo del espacio. Para el estudio se simularon nueve escenarios con diferentes sistemas de acristalamiento, con el fin de analizar los efectos sobre ganancias de calor y poder establecer el escenario óptimo que logre un mejor desempeño termo-energético y adecuada iluminación natural en el edificio.

## 2. Metodología

Para el estudio se analizó la correlación entre iluminación natural y consumo energético de la edificación al cambiar el tipo de acristalamiento, a partir de un caso de estudio ubicado en Mexicali, Baja California, México en el que se analizó el cumplimiento de índices de iluminación de acuerdo con las normas mexicanas NOM-024-ENER-2012, NOM-025-STPS-2008, NOM-030-ENER-2016 y NOM-

035-STPS-2018, así como de estándares internacionales WELL, LEED y ASHRAE.

En el sector no-residencial, existe una gran demanda por modernizar edificios para reducir su consumo energético, y a su vez, maximizar el uso de luz natural, sobre todo para aquellos edificios limitados espacialmente en sus remodelaciones (Koh et al). En México, es común que edificios de vivienda se transformen en oficinas, lo que genera espacios de trabajo sin las condiciones necesarias para un ambiente de calidad, por lo que, una de las soluciones para mejorar la iluminación del edificio, con el menor costo de inversión es a través de las ventanas del edificio.

En climas cálido seco extremo, las propiedades del vidrio como tipo, color, espesor y su impacto al ambiente interior del edificio ha sido poco explorada (Mohamed y Fikryb), por lo que, para el diagnóstico de calidad de iluminación, se utilizó la herramienta de análisis *Design Builder* v.5.4.0 para evaluar diferentes propuestas de sistemas de acristalamiento (espesor, tono y materiales del vidrio, así como capas del sistema).

Los resultados obtenidos del simulador se compararon con la normatividad nacional e internacional y se establecieron deficiencias o excesos de calidad de iluminación en cada uno de los espacios interiores del caso de estudio. Finalmente, se determinó la propuesta óptima, que permitió mantener niveles de iluminación adecuados y disminuir el consumo energético de la edificación.

### 2.1 Caso de estudio



El caso de estudio fue un edificio no-residencial usado como oficina del sector privado. El edificio está emplazado sobre de un terreno de forma rectangular de 284.8 m<sup>2</sup>, con un área construida de 266.7 m<sup>2</sup> y un volumen de 746.7 m<sup>3</sup> dividido en dos niveles. La planta alta (PA) de 135.9 m<sup>2</sup> con un volumen de 380.7 m<sup>3</sup> y planta baja (PB) de 130.8 m<sup>2</sup> con un volumen de 366.3 m<sup>3</sup>. La fachada principal del edificio está orientada al norte, mientras que las fachadas este y oeste se encuentra colindantes a otros edificios como se puede observar en la figura 1.



Figura 1. Fachada principal edificio estudio.

Para el estudio de iluminación natural y termo-energético, se tomó como base el análisis de espacios con acristalamiento en fachadas norte y sur, es decir, siete de los 20 espacios. No se estudió la zona oeste de planta alta, ya que forma parte de otra empresa.

Los espacios analizados en PB se ubican en fachada norte. Dos de ellos son zonas usadas como oficinas y están afectadas con aleros que provocan sombreado; la ubicación de estas se muestra en la figura 2. La zona O1, con 13 m<sup>2</sup> y 36m<sup>3</sup> de volumen, cuenta con una ventana orientada al oeste; mientras que la zona O2, con 4 m<sup>2</sup> y 11 m<sup>3</sup>, tiene una ventana orientada al este. Por último, la zona C1, con 9 m<sup>2</sup>, volumen de 25 m<sup>3</sup>, es utilizada como cafetería y cuenta con una ventana orientada al norte.

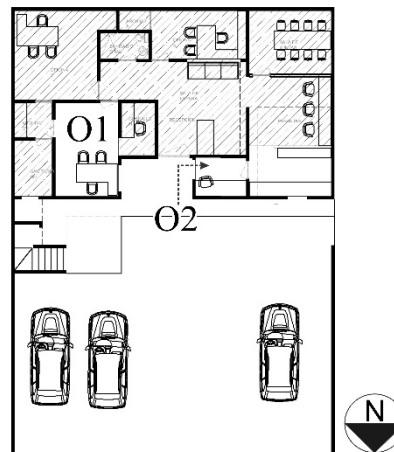


Figura 2. Planta arquitectónica baja.

Los espacios analizados en PA se encuentran en la fachada norte y sur. Cuenta con vanos que iluminan tres zonas de oficina y el vestíbulo principal: O3 y O4 con 15 m<sup>2</sup> y volumen de 41 m<sup>3</sup> ubicados con ventanas orientación sur; O5 con 8 m<sup>2</sup> y volumen de 22 m<sup>3</sup> y V1 con 5 m<sup>2</sup> y volumen de 13.9 m<sup>3</sup> con ventanas en orientación norte; su distribución se muestra en la figura 3.

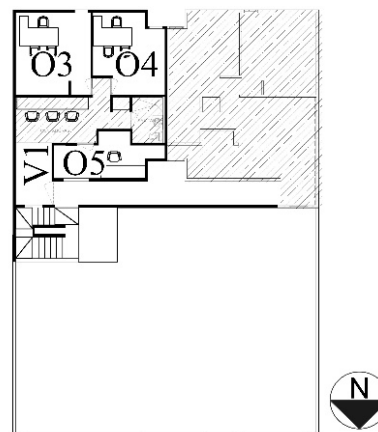


Figura 3. Planta arquitectónica alta.

## 2.2 Sistemas constructivos y parámetros de simulación.

La programación de parámetros de simulación fue obtenida a partir del proyecto arquitectónico, por levantamiento físico del caso de estudio y monitoreo ambiental, los cuales se muestran en



la tabla 1. Dicha tabla, describe los sistemas constructivos de la envolvente y su interior, la configuración del sistema de aire acondicionado necesario para el periodo de verano, las ganancias térmicas por ocupación, equipos electrónicos e iluminación artificial y, por último, se establece el rango iluminación óptimo recomendado para el tipo de edificio analizado.

### 2.3 Simulación

El simulador utilizado para modelar el caso de estudio fue *Design Builder v.5.4.0* debido a que permite evaluar con precisión el comportamiento térmico de la edificación, así como la calidad de iluminación natural.

Para el estudio se realizó la programación de las condiciones climáticas en el simulador, mediante el archivo tipo EPW (*Energy Plus Weather*) de la estación climática No.747185, ubicada a una latitud 32.8N y longitud 115.66O al ser la más cercana al caso de estudio, obtenida a partir de *Climate Consultant 6.0*, la cual registra una temperatura de bulbo seco (TBS) promedio de 22.95°C, máxima de 47.1°C y mínima de -1.1°C. La radiación global horizontal máxima promedio anual de 751 W/m<sup>2</sup>.

Después, se programaron las características de la envolvente, cargas internas, de climatización e iluminación natural descritos en la tabla 1.

Para la simulación base, se estableció el caso real de acristalamiento con vidrio claro de 6 mm, además, se realizaron nueve simulaciones con diferentes tipos de vidrio con características distintas de transmitancia solar, transmitancia de luz visible y valor U, variables que afectan de manera directa en los resultados del simulador, ya que los efectos derivadas de las ganancias solares por el tipo de acristalamiento, afectan la calidad de iluminación y su respectivo incremento o decremento de iluminación

artificial. Por otro lado, se evaluaron las ganancias térmicas del espacio y su incremento o reducción de capacidad de climatización artificial.

Finalmente, con los resultados de simulación se determinó el acristalamiento con el mejor desempeño energético en la edificación que permitió cumplir con las normas mexicanas e internacionales; en la figura 4 se muestra el esquema metodológico seguido para la simulación para estimar el confort lumínico sin comprometer el desempeño energético del edificio.

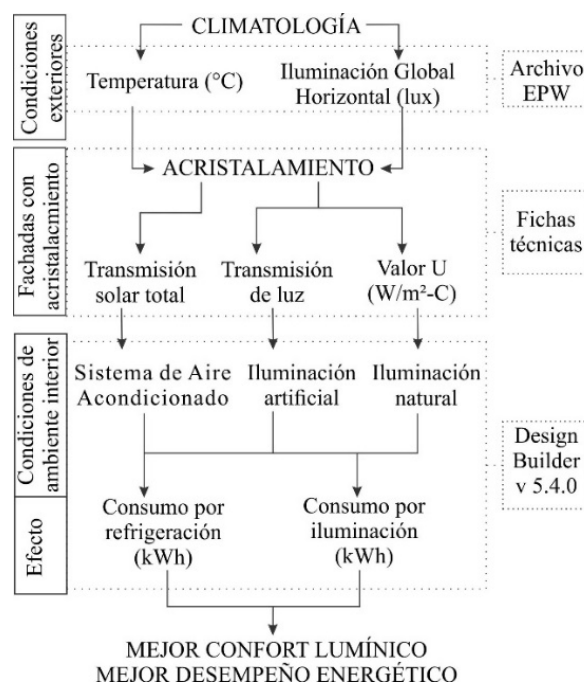


Figura 4. Esquema metodológico general para el estudio.



Tabla 1. Sistemas constructivos, cargas internas, sistemas de climatización y parámetros de iluminación del edificio.

|                                  | Parámetro                                    | Descripción  | Unidad   |
|----------------------------------|--|--|--|
| Sistema constructivo             | Piso   | Concreto armado de 0.10m, loseta cerámica rectificada                                    | 198.8 m <sup>2</sup>   |
|                                  |  |  | Emisividad: 0.90 <sup>(1)</sup>                                  |
|                                  |  |  | Absortancia: 0.60 <sup>(1)</sup>                                 |
|                                  | Cubierta                                     | 0.003m pintura elastomérica exterior, vigueta y bovedilla de 0.17m                       | 198.8 m <sup>2</sup>   |
|                                  |  |  | Emisividad: 0.90 <sup>(1)</sup>                                  |
|                                  |  |  | Absortancia: 0.30 <sup>(1)</sup>                                 |
|                                  | Plafón                                       | Rígido, tablaroca y yeso de 0.015 m  | 174.0 m <sup>2</sup>   |
|                                  |  |  | Emisividad: 0.77 <sup>(2)</sup>                                  |
|                                  |  |  | Absortancia: 0.23 <sup>(2)</sup>                                 |
|                                  | Muros perimetrales                           | Mortero cemento arena 0.015, bloque de concreto de 0.20m x 0.40m x 0.15m y yeso de 0.015 | 223.2 m <sup>2</sup>   |
|                                  |  |  | Emisividad: 0.82 <sup>(1)</sup>                                  |
|                                  |  |  | Absortancia: 0.18 <sup>(1)</sup>                                 |
|                                  | Muros interiores                             | Yeso 0.015m, cartón de yeso de 0.013m, fibra en rollo de 0.12m, Yeso 0.015m              | 266.8 m <sup>2</sup>   |
|                                  |  |  | Emisividad: 0.82 <sup>(1)</sup>                                  |
| Absortancia: 0.18 <sup>(1)</sup> |  |  |  |
| Ventanas perimetrales            | Marquetería de aluminio, vidrio claro 6 mm   | 10.9 m <sup>2</sup>  |  |
|                                  |  | Transmisión solar: 0.82  |  |
|                                  |  | Transmisión de luz: 0.85   |  |
| Ventanas interiores              | Marquetería de aluminio, vidrio claro 6 mm   | 0.50   |  |
|                                  |  | Valor U: 5.8 W/m <sup>2</sup> -K   |  |
| Puertas exteriores               | Madera                                       | 17.2 m <sup>2</sup>  |  |
|                                  |  | Transmisión solar: 0.82  |  |
| Puertas interiores               | Tipo tambor                                  | Transmisión de luz: 0.85   |  |
|                                  |  | Valor U: 5.8 W/m <sup>2</sup> -K   |  |
| Cargas internas                  | Ocupación                                    | Densidad   | 6.5 m <sup>2</sup>   |
|                                  |  | Tasa metabólica  | 29 m <sup>2</sup>  |
|                                  |  | Factor metabólico  | 0.17 persona/m <sup>2</sup>                                      |
|                                  |  | Vestimenta   | 119 W/persona  |
|                                  | Equipo electrónico                           | Potencia absoluta de zona  | 0.93 met   |
|                                  |  | Fracción radiante  | Verano (0.50 clo)  |
|                                  | Iluminación artificial                       | Potencia absoluta  | Invierno (1.00 clo)  |
|                                  |  | Fracción radiante  | 66.99 W/m <sup>2</sup>   |
|                                  |  | Fracción visible   | 0.2  |
|                                  |  | Fracción convección  | 2.26 W/m <sup>2</sup>  |
| Sistema de climatización         | Equipo de aire acondicionado de paquete      | SEER   | 0.45   |
|                                  |  | Toneladas  | Planta baja: 15      Planta alta:15                              |
|                                  |  | Consigna de temperatura  | Planta baja: 5 ton (6,000 btu)<br>Planta alta: 3 ton (3,600 btu) |
|                                  | Equipo de aire acondicionado tipo mini-split | SEER   | 9am-9pm:24°C, < 9am:28°C, > 9pm:28°C                             |
|                                  |  | Toneladas  | Oficina A Planta baja: 16  |
|                                  |  | Consigna de temperatura  | 2 (2400 btu)<br>2pm-4pm: 24°C                                    |
| Iluminación natural              | Programación                                 | Límite inferior áreas de trabajo   | 300 lux  |
|                                  |  | Límite inferior áreas de servicio  | 200 lux  |
|                                  |  | Deslumbramiento  | 900 lux  |
|                                  |  | Altura de plano de trabajo   | 0.75 m   |

Anotaciones: <sup>(1)</sup> Valor para superficie exterior. <sup>(2)</sup>Valor para superficie interiores.





## 2.4 Factor Luz Día

Para el estudio del FLD, se buscó que la calidad de iluminación de los espacios estuviera entre los 300 lx y 900 lx en un plano de trabajo a 0.75m.

Con la intención de conocer el comportamiento lumínico de la edificación en distintos escenarios, se evaluaron cuatro condiciones de cielo claro (CIE claro), a las 12 horas del día. El estudio se realizó para el 21 de marzo con una altitud solar de  $57^\circ$  y una iluminancia global de cielo de 91,169 lx, 21 de junio con una altitud solar de  $81^\circ$  e iluminancia global de 10,737 lx, el 21 de septiembre a una altitud solar de  $58^\circ$  e iluminancia global de 88,917 lx y el 21 de diciembre con altitud solar de  $34^\circ$  con una iluminancia global de cielo de 34,070 lx.

Finalmente, se evaluó un día de cielo nublado (CIE nublado) con iluminancia global horizontal de cielo de 34,324 lx, que representa el día promedio mínimo de iluminancia de cielo para día nublado para el clima analizado.

## 2.5 Tipos de acristalamiento

El análisis de acristalamiento se realizó con 10 sistemas distintos. El caso base, corresponde a las condiciones reales del edificio: vidrio claro de 6 mm (S-SC) en todos los vanos acristalados. Se continuó con el análisis de cuatro casos de vidrios sencillos, de los cuales tres cuentan con un espesor de 6 mm y uno de 9.5mm; por último, se analizaron cinco sistemas con doble acristalamiento de 25 mm de espesor, cuatro de ellos cuentan con dos vidrios de 6 mm separados por espacio de aire y uno más, también con dos vidrios de 6 mm, pero separado por espacio con gas argón.

La selección de tinte, recubrimiento, propiedades de transmisividad y valor U de los sistemas de acristalamiento, se basó en la literatura revisada y fichas técnicas de vidrios [44] comercializados en la industria mexicana.

Entre las muestras de vidrio sencillo se encuentran: vidrio de tinte azul turquesa (S-AZ), tinte gris medio (S-FS), tinte azul ligero y tenue (S-OB) y vidrio tinte azul cielo brillante (S-SB). De la misma manera, la muestra de sistemas doble acristalamiento se compone de: D-SP con doble vidrio ultra claro, D-SBSC con un vidrio S-SB y uno S-SC, D-AZSC que incluye un vidrio S-AZ y uno S-SC, D-S7 conformado por dos vidrios Low-E claro con recubrimiento de triple plata pulverizado y, por último, D-AC de doble vidrio Low-E claro con bajo contenido en hierro.

Las propiedades de cada sistema mostradas en la tabla 2, se obtuvieron de la ficha técnica del fabricante del vidrio, información importante para el simulador como: transmitancia, para establecer el porcentaje de radiación incidente transmitida en el material; reflectancia para el porcentaje de radiación incidente reflejada; el coeficiente global de transferencia de calor (U), para establecer la densidad de transferencia de calor por diferencia de temperatura entre ambientes; el coeficiente visible térmico (LSG), que estableció la razón entre la transmitancia visible y U del sistema de acristalamiento; y por último, el coeficiente de ganancia de calor solar (CGCS), para establecer la ganancia de calor que entra a través de un sistema por radiación solar incidente [30].



Tabla 2. Propiedades de sistemas de acristalamiento simulados.

| CÓDIGO | TIPO   | TRANSMITANCIA (%) | REFLECTANCIA (%) | U (W/m²K) | CGCS | LSG  |
|--------|--|-------------------|------------------|-----------|------|------|
| S-SC   | Vidrio claro 6 mm  | 85%               | 8%               | 5.82      | 0.82 | 1.08 |
| S-SB   | Vidrio azul cielo brillante 9.5 mm   | 41%               | 5%               | 5.69      | 0.51 | 0.8  |
| S-OB   | Vidrio tinte azul tenue y neutral 6 mm   | 64%               | 6%               | 5.47      | 0.74 | 0.87 |
| S-FS   | Vidrio gris medio 6 mm   | 45%               | 5%               | 5.82      | 0.59 | 0.76 |
| S-AZ   | Vidrio azul turquesa 6 mm  | 68%               | 7%               | 5.82      | 0.52 | 1.31 |
| D-SP   | Low-E: Vidrio claro 6mm + aire 13 mm + claro 6mm   | 80%               | 14%              | 1.82      | 0.73 | 1.1  |
| D-SBSC | Vidrio tinte azul cielo brillante 6mm + aire 13 mm + claro 6mm                               | 50%               | 9%               | 0.66      | 0.49 | 1.02 |
| D-S7   | Low-E con recubrimiento triple plata: Vidrio ultra claro 6mm + argón 13 mm + ultra claro 6mm | 64%               | 13%              | 1.58      | 0.27 | 2.37 |
| D-AZSC | Vidrio tinte azul turquesa 6mm + aire 13 mm + claro 6mm                                      | 61%               | 11%              | 2.66      | 0.39 | 1.56 |
| D-AC   | Vidrio bajo contenido en hierro: Claro 6mm + aire 13 mm + claro 6mm                          | 53%               | 12%              | 1.34      | 0.23 | 2.22 |

Fuente: Vitro Vidrio Arquitectónico [44].

Transmitancia y reflectancia, referente a luz visible.

U: Coeficiente global de transferencia de calor.

CGCS: Coeficiente de ganancia de calor solar.

LSG: Coeficiente visible térmico.

### 3. Resultados

#### 3.1 Iluminación natural estacional

La iluminación natural en un edificio está condicionada por el diseño de elementos traslucidos presentes en la envolvente. Cuando la iluminación natural es el principal método de iluminación interior, se debe prestar especial atención en la ubicación y diseño de ventanas, aunque el valor óptimo para equilibrar la iluminancia y ganancia de calor solar, se logrará al analizar el caso específico mediante las propiedades térmicas del material, así como la correcta selección de elementos de sombreado [24].

En términos generales, se encontró que el edificio tiene problemas de iluminación mayores en

fachada sur que en fachada norte ya que al comparar la relación V-S y V-M con la investigación de Shaeri, et al., se encontró que las zonas O3 y O4 tienen una relación V-S menor al 10% recomendado, como se puede observar en la tabla 3; sin embargo, a pesar de que fachada norte tiene mejor iluminación natural, solo dos zonas están cercanas al 20% de relación V-M que Shaeri, et al. recomiendan para iluminación óptima.

Así pues, se encuentra iluminación óptima en V1 con V-M de 26% y V-S de 24%, y O2 con un V-M de 18% y V-S de 24%, lo que representa que la relación V-M no es el único factor para obtener condiciones de confort lumínico natural en espacios, sino que, la relación V-S también es un factor importante al analizar la situación particular de cada zona.



Tabla 3. relación vano-suelo, vano-muro e iluminación promedio por zona analizada.

| ZONA                        | ÁREA (m <sup>2</sup> ) |                |                | RELACIÓN DE ÁREAS (%) |                  | ILUMINACIÓN PROMEDIO (lux 12:00pm) |        |        |                  | FLD PROMEDIO (%) |        |        |                  | ÁREA DE SUELO DENTRO DE LÍMITES (%) |        |        |                  |
|-----------------------------|------------------------|----------------|----------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|--------|--------|------------------|------------------|--------|--------|------------------|-------------------------------------|--------|--------|------------------|
|                             | S <sup>a</sup>         | M <sup>b</sup> | V <sup>c</sup> | V-M <sup>d</sup>      | V-S <sup>e</sup> | 21-mar                             | 21-jun | 21-dic | Nub <sup>f</sup> | 21-mar           | 21-jun | 21-dic | Nub <sup>f</sup> | 21-mar                              | 21-jun | 21-dic | Nub <sup>f</sup> |
| C1 (Norte)                  | 10.5                   | 10.7           | 1.0            | 9%                    | 10%              | 300                                | 458    | 221    | 435              | 2.6              | 2.6    | 2.3    | 2.2              | 17%                                 | 41%    | 5%     | 25%              |
| O1 (Oeste)                  | 15                     | 13.7           | 1.6            | 12%                   | 11%              | 373                                | 475    | 250    | 189              | 2.7              | 2.5    | 2.2    | 1.0              | 26%                                 | 41%    | 12%    | 2%               |
| O2 (Este)                   | 5.5                    | 7.5            | 1.3            | 18%                   | 24%              | 424                                | 577    | 312    | 155              | 4.8              | 4.5    | 4.0    | 1.1              | 99%                                 | 100%   | 49%    | 0%               |
| O3 (Sur)                    | 17.3                   | 10.6           | 1.0            | 9%                    | 6%               | 643                                | 643    | 824    | 337              | 1.2              | 1.2    | 1.8    | 0.6              | 5%                                  | 5%     | 9%     | 2%               |
| O4 (Sur)                    | 16.4                   | 11.2           | 1.0            | 9%                    | 6%               | 482                                | 482    | 765    | 258              | 1.0              | 1.0    | 1.7    | 0.5              | 5%                                  | 5%     | 10%    | 1%               |
| O5 (Norte)                  | 10                     | 14.6           | 1.7            | 11%                   | 17%              | 607                                | 607    | 472    | 321              | 5.4              | 5.4    | 4.5    | 2.2              | 52%                                 | 52%    | 43%    | 32%              |
| V1 (Norte)                  | 5.9                    | 5.5            | 1.4            | 26%                   | 24%              | 532                                | 532    | 415    | 288              | 5.7              | 5.7    | 4.5    | 2.2              | 89%                                 | 89%    | 66%    | 27%              |
| PROMEDIO DE TODAS LAS ZONAS |                        |                |                |                       |                  | 480                                | 539    | 466    | 283              | 3.3              | 3.3    | 3.0    | 1.4              | 42%                                 | 48%    | 28%    | 13%              |

Anotaciones: <sup>(a)</sup> S: Suelo <sup>(b)</sup> M: Muro <sup>(c)</sup> V: Ventana. <sup>(d)</sup> V-M: Ventana -Muro <sup>(e)</sup> V-S: Ventana-Suelo. <sup>(f)</sup> Nub: Cielo nublado

En los días analizados, todas las zonas superan los 300 lx, a excepción del día nublado, en el que O1, O2 y O4 no cumplen con la NOM-025, ya que sus valores promedio por zona son menores; sin embargo, para el resto de las zonas, superar el límite establecido por la norma mexicana, no representa que la iluminación natural es óptima para el área de trabajo, ya que el porcentaje de área de suelo iluminado es menor al 55% que establece el estándar internacional de la USGBC, para el diseño de luz natural en espacios interiores.

Al comparar la relación V-M y V-S de cada zona, se encontró que la mayor afectación está en O3 y O4, ya que el porcentaje de área iluminada es menor al 10%, como se aprecia en la tabla 3. Sin embargo, se encontraron otras dos zonas con valores cercanos en su relación: O1, con V-M de 12% y V-S de 11% que permite iluminación óptima entre el 2% y 41% de suelo en el peor y mejor escenario de cielo; y por último, la zona C1 con un V-M de 9% y V-S de 10% permite el 5%

de área iluminada de suelo en el día crítico y 41% para el mejor caso de cielo, ligeramente más área de suelo iluminada que en O1 a pesar de que los valores de V-M y V-S de C1 son menores. Esto indica que además de la proporción de la ventana en el espacio, otros factores como orientación y elementos de sombreado son importantes para analizar la iluminancia natural en el espacio.

Las zonas mejor iluminadas son O2 y C1, que además de tener mayor V-M, comparten la característica de un vano centrado al muro. V1 con V-M de 26% logra iluminar entre 27% y 89% de área de suelo durante los casos analizados y O2, con una relación V-M de 18% logró iluminar 49% del área de suelo, en el caso del 21 de diciembre y 99% y 100% para los casos de 21 de marzo y 21 de junio.

Para el resto de las zonas con V-S mayor a 10%, la iluminación natural se aprovecha, pero no es suficiente para cumplir con el estándar internacional. Además, la iluminación es peor en



aquellas en que el vano está situado a un extremo del muro, como en el caso de O1, O3 y O4; en la figura 5 se observa las variaciones del porcentaje

de área iluminada de cada zona, según las distintas simulaciones de cielo.

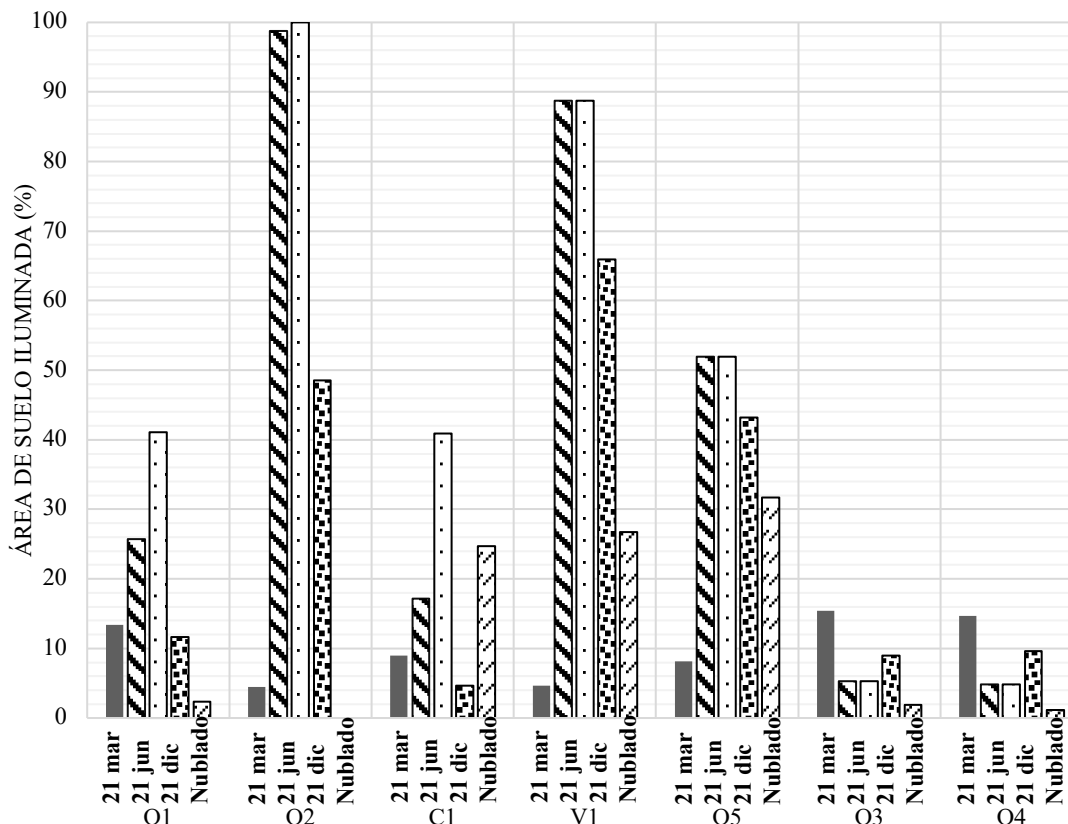


Figura 5. Porcentaje de área por zona, con iluminación natural mayor 300 lux.

La selección del mejor y peor comportamiento corresponde con el promedio de iluminancia global exterior, pues este se reflejó en la iluminación de las zonas analizadas; tal fue el caso del 21 de junio con 539 lx promedio, después el 21 de marzo con 480 lx promedio, que representa 12% menos que el solsticio de verano, posteriormente el 21 de septiembre con 11% menos iluminación, y en el último lugar de análisis de cielo claro, se encontró el 21 de diciembre con un promedio de 465 lx que representa una pérdida de 16% de iluminación conforme al mejor caso.

Finalmente, el peor escenario de diseño fue del cielo nublado, ya que se encontró con 63% menos iluminación contra la simulación del 21 de junio.

Cabe destacar que el caso del 21 de septiembre quedó fuera del análisis específico ya que la diferencia de resultados por zona fue menor a 1% en comparación al cielo del 21 de marzo. Además, aunque el mejor caso de estudio se encontró el 21 de junio, se eligió como caso promedio para comparar los distintos sistemas de acristalamiento, a aquel más cercano al promedio anual de la iluminancia global otorgada por la



estación climática No.747185, que corresponde al 21 de marzo.

A continuación, se discuten los resultados para cada uno de los cielos de diseño para la evaluación del caso de estudio.

### 3.2 Caso base en cielo nublado

Los resultados de simulación de cielo nublado representan las condiciones críticas de iluminación natural en el edificio analizado, ya que solo en el 8% del área total de las zonas superan la calidad de iluminación establecida en la NOM-025-STPS-2008, pero no logran cumplir con el estándar internacional de la USGBC.

En general, las ventanas con orientación norte permiten mejor iluminación natural, ya que a pesar de tener diferencias en su relación V-M, tienen un V-S igual o mayor al 10% en comparación a aquellas en orientación sur, en donde su relación V-S es de 6%; menor a lo establecido por Shaeri et al. (2019) como suficiente para aprovechar la iluminación natural.

En la fachada principal, las zonas con mejor iluminación son, O5 con 27% de área de suelo iluminada con un V-M de 17%; V1, 27% de área de suelo iluminada con un V-M de 24%; y C1, 25% de iluminación de suelo con un V-M de 10%; cabe recalcar que la iluminación es deficiente para áreas de trabajo pues es menor al 55% del estándar internacional; el porcentaje específico por zona se puede observar en la figura 5.

Las dos últimas zonas ubicadas en fachada principal, O1 y O2 están remetidas en la edificación, lo que resulta en iluminación deficiente debido a elementos que sombrean los vanos de cada zona. La que mayor afectación tiene es la O2 al lograr un promedio de

iluminación 155 lx; cabe destacar que su relación V-M es de 18%, ligeramente por debajo del 20% recomendado por Shaeri et al. (2019), sin embargo, el entrepiso es un elemento de sombreado amplio y no permite una mejor condición de iluminación a pesar de tener un vano centrado a muro. En la figura 6, se puede visualizar la distribución de iluminación natural en las zonas analizadas de planta baja.

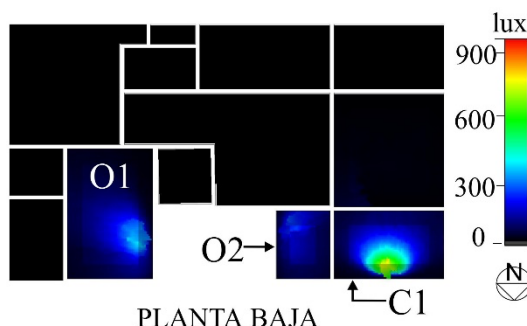


Figura 6. Distribución de iluminación natural para día nublado en planta baja.

Finalmente, para la fachada sur, la zona O3 se podría beneficiar de iluminación natural en un día nublado si el V-M fuera mayor al 9% que tiene actualmente, pues permitiría un mayor porcentaje de suelo iluminado, ya que esta zona generó un promedio de 337 lx, ligeramente por arriba de lo que la norma mexicana establece. En la figura 7 se puede observar la distribución de iluminación natural en las diferentes zonas de caso de estudio en planta alta.

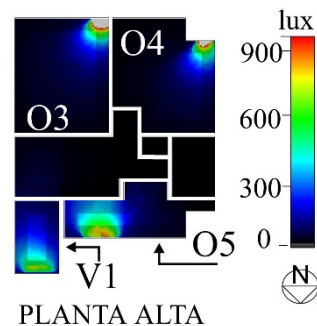


Figura 7. Distribución de iluminación natural para día nublado en planta alta.



### 3.3 Caso base en cielo claro

A partir del estudio de cielo claro para los solsticios y equinoccios se conocen condiciones de iluminación natural bajo diferentes periodos estacionales. A continuación, se describen los resultados de iluminación natural para cielo claro en los días 21 de marzo, 21 de junio y 21 de diciembre.

#### 3.3.1 Cielo claro 21 marzo

Los resultados de simulación para el 21 de marzo muestran que las zonas con mayor beneficio son aquellas con relación V-M mayor; de las cuales la zona con mejor iluminación fue la O2 con un promedio de 424 lx en 99% de área. Cabe destacar que el espacio no recibe radiación solar directa debido al entrepiso que sombrea la ventana, pero la forma rectangular vertical de vano y un V-M de 24%, permitió aprovechar la altura del espacio para distribuir la iluminación de manera uniforme y alcanza a iluminar a mayores profundidades el espacio.

La zona O1 cuenta un promedio de 373 lx, esto es 13% menos iluminación que el espacio O2 a pesar de compartir características similares respecto a su ubicación en la distribución del edificio; mientras el vano de O2 se sitúa en el muro este y O1 en el muro oeste, su diferencia más importante se encuentra en la relación V-S, así como la ubicación y forma de la ventana, ya que O1 tiene un vano rectangular horizontal situada en un extremo del muro con 13% menos V-S que O2.

La calidad de iluminación en los espacios de la planta alta es mejor debido a que tienen mayor V-S que en planta baja. Así pues, el 89% del área de suelo iluminada en V1 tiene un promedio de 532 lx y el 52% del área del suelo de O5, se ilumina con 607 lx. Cabe destacar que la zona V1 cuenta

con el techo del cubo de escaleras que genera un área de sombreado mayor que evita el deslumbramiento, a diferencia de la ventana en la zona O5, en donde el volado de cubierta es más corto y la iluminación máxima de este espacio sobrepasa el límite de iluminación.

Finalmente, en los casos O3 y O4 se encuentran los promedios de iluminación más altos de todas las zonas, sin embargo, con los porcentajes de área de suelo iluminado más bajos; ya que con 482 lx y 607 lx respectivamente, solo el 5% del área de suelo se ilumina, esto debido a una baja relación V-M.

#### 3.3.2 Cielo claro 21 junio

El mejor escenario para iluminación natural es el 21 de junio al tener mayor iluminancia global. Los siete espacios reciben un total de 3,773 lx, lo que incrementó la iluminación natural en un 63% respecto al cielo nublado (caso crítico).

En el solsticio de verano todas las zonas superan los 300 lx, con los niveles más altos en la O3 con 646 lx y, O5 con 607 lx, sin embargo, a pesar de tener los niveles más altos de iluminación, no genera una condición favorable para la calidad de ambiente lumínico al tener V-M con valores bajos.

En el caso de O4 (fachada sur), la ventana cuenta con un elemento que sombrea al vano y obstruye el paso directo de los rayos del sol, sin embargo, permite una iluminación de 482 lx en el espacio. Los espacios O1 y C1, tienen iluminación natural dentro del rango establecido en el 41% del área de suelo de acuerdo.

#### 3.3.3 Cielo claro 21 diciembre

En el solsticio de invierno se disminuye la iluminación natural en los espacios a 28% del total de área analizado. Se encuentran dos zonas



que no cumplen con la norma mexicana: C1 con calidad de iluminación promedio de 221 lx y la zona O1, con 250 lx promedio.

Las zonas con mejor iluminación se ubican en planta alta con orientación norte. El único espacio que logra cumplir con la especificación nacional e internacional fue V1 con 66% del área iluminada por 415 lx promedio. Después se encuentra el espacio O5 que cumple con la norma nacional al iluminarse con 472 lx, pero no con la recomendación de la USGBC pues solo el 43% del área de suelo tiene iluminación óptima.

Las zonas con peor iluminación se encuentran en O3 y O4 ya que a pesar de tener una iluminancia promedio por zona de 824 lx, esta solo se presenta en 9% para O3 y 10% para O4, lo que validaría el estudio de Shaeri et al. (2019) para el solsticio de invierno.

### 3.4 Sistemas de acristalamiento y calidad de iluminación.

La calidad y cantidad de luz natural en ambientes interiores está condicionada por las características de la envolvente del edificio, pero principalmente por las propiedades ópticas de la superficie del material de las ventanas. Existen en el mercado una gran cantidad de sistemas de acristalamiento que varían en su espesor y color, e incluso recubren el material por metales con el fin de aumentar el valor U o disminuir el CGCS.

En términos generales, el sistema de acristalamiento S-SC, tiene un total promedio de 481 lx, posicionándolo como el mejor sistema de acristalamiento para iluminación natural en el caso de cielo claro del 21 de marzo.

A partir del análisis por simulación se encontró que al comparar los nueve sistemas de acristalamientos con el caso base, la iluminación natural disminuye; además, solo seis permiten

buena iluminación natural al sobrepasar los 300 lx en las zonas. Esto establece que la calidad de iluminación natural en el espacio no se puede mejorar al cambiar las propiedades físicas del material, sino que es necesario realizar cambios en la envolvente del edificio para mejorar la relación V-M y V-S de cada espacio.

La mejor iluminación en los nueve sistemas de acristalamiento comparados fue con el vidrio ultra claro S-AZ, ya que permitió un promedio total de 373 lx, lo que representa solo 22% menos que caso base.

En segundo lugar, está al vidrio D-AC al permitir 361 lx promedio, que representa una pérdida de 25% de iluminación en las zonas; después, el vidrio S-OB y D-SBSC pues ambos iluminaron en promedio 26% menos que el caso base, al resultar en 357 lx cada uno. Por último, el sistema de acristalamiento con vidrio de 9 mm de espesor, S-SB permitió un promedio de 307 lx en las zonas analizadas (40% menos que caso base).

Una vez comparados los diferentes sistemas de acristalamiento por zona, se encontró que el color de vidrio con menos pérdidas de iluminación fue con tinte azul (S-AZ y S-OB). De esta manera se comprueba que la combinación de propiedades térmicas como transmitancia solar y mayor CGCS brindarán una mejor iluminación natural al espacio.

Además, los sistemas de acristalamiento de vidrio sencillo permiten mejor iluminación contra los dobles tal como se puede observar en la figura 8, así pues, los únicos sistemas de acristalamiento que quedaron con zonas por debajo de los 300 lx establecidos, son D-S7SC que permitió en O5 un promedio de iluminación de 297 lx (61% menos que el caso base), D-AZSC con las zonas V1 y O5 con 275 lx y 296 lx cada espacio (60% menos que S-SC), y por último, S-FS con las zonas V1 en 282 lx (69%



menos que S-SC), O4 con 258 lx promedio (71 % menos) y O5 con 285 lx (74% menos).

En síntesis, el cambio de sistema de acristalamiento de vidrio doble a vidrio sencillo

ayuda a evitar el deslumbramiento en espacios ya que disminuye las ganancias solares, pero es importante seleccionar el vidrio adecuado para permitir mejores condiciones de iluminación en zonas con vanos pequeños.

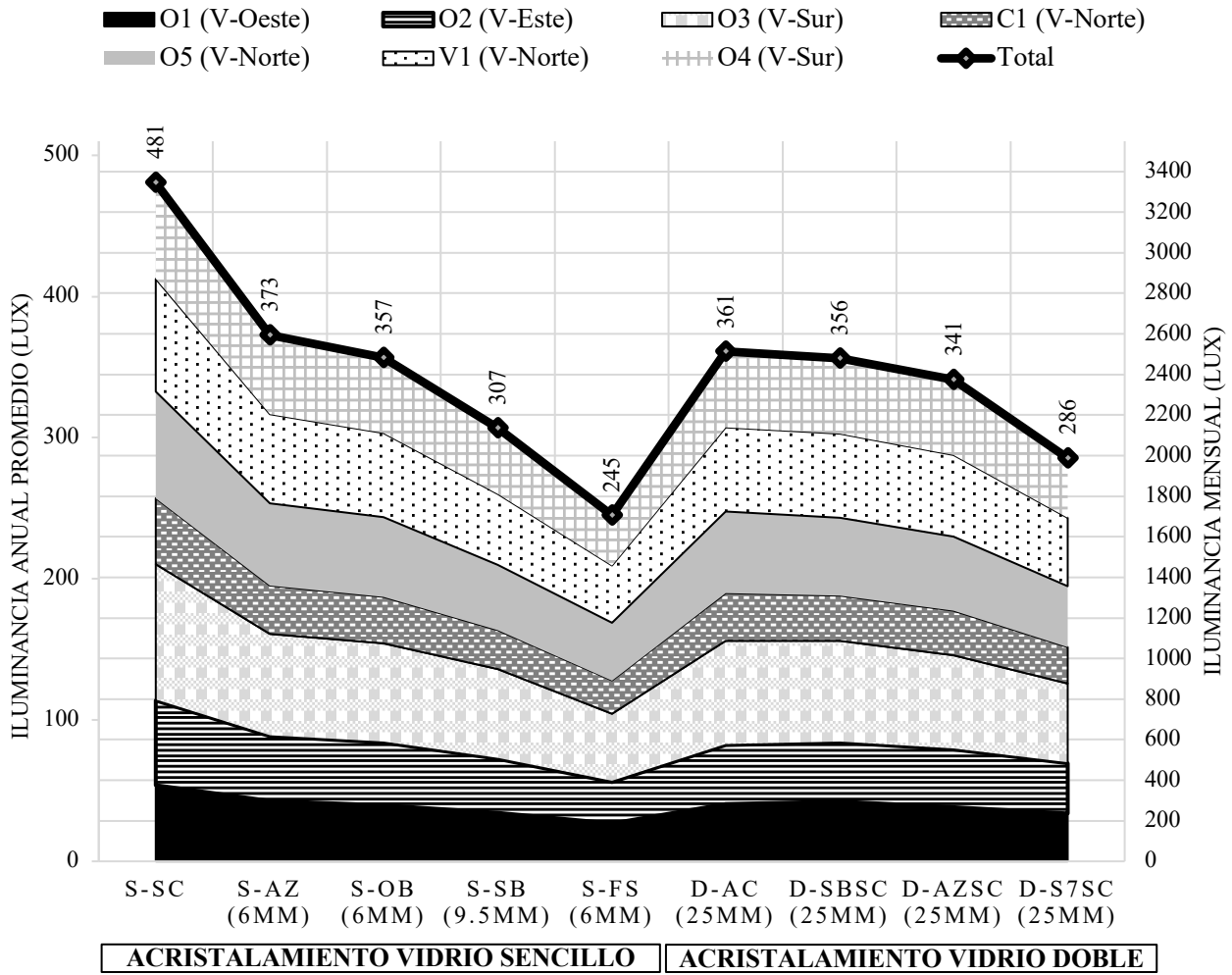


Figura 8. Iluminancia por zona, con diferentes tipos de vidrios.

### 3.5 Ganancias térmicas por tipo de vidrio

La relación entre elementos traslucidos y opacos de la envolvente es la característica que más afecta en la eficiencia energética de ventanas. Un valor alto de LSG puede maximizar la iluminación en el espacio y reducir las ganancias de calor solar; sin embargo, el mejor rendimiento

se encontrará en aquel sistema de acristalamiento que reduzca las ganancias de calor por acristalamiento, pero no comprometa la iluminación natural del espacio por debajo de lo estipulado en la NOM-025. Una regla general propuesta por la ASHRAE [24] para el diseño de iluminación natural, es seleccionar acristalamientos con menores ganancias por





radiación solar, sin embargo para minimizar las ganancias de calor y aprovechar la luz natural, se recomienda usar aquellos productos con transmitancia al menos 3 veces mayor que el CGCS.

Al analizar las ganancias mensuales por sistemas de acristalamiento para el caso de estudio, se obtiene que el peor comportamiento térmico lo tiene el vidrio base S-SC, ya que anualmente aporta al consumo energético 2,181 kWh.

Tras comparar los resultados por ganancias de los diferentes sistemas de acristalamiento los cuales se pueden observar en la figura 9, se observó que las propiedades del material que tienen el mejor comportamiento térmico son aquellos con menor CGCS y mayor LSG. Dicho así, los vidrios con

mejor comportamiento térmico comparados en el caso base son los vidrios claros Low-E, ya que D-S7SC disminuye ganancias en 84% y D-AC en 79%, después aquellos con tinte azul turquesa, pues D-AZSC disminuye en 64% y S-AZ, 55% menos ganancias de calor. Por último, el tinte azul cielo brillante D-SBSC, reduce a 50% las ganancias térmicas.

Después, aquellos sistemas de acristalamiento sencillo con vidrio tintado, S-FS de tinte gris, reduce 49% de ganancias de calor; S-SB con tinte azul cielo brillante, reducen 40%, D-SP con vidrio ultra claro, reducen a 18% a pesar de ser un vidrio Low-E; y, por último, el vidrio con peor comportamiento, fue el sencillo tinte azul ligero S-OB al reducir solo en 14% la aportación de calor por ventanas.

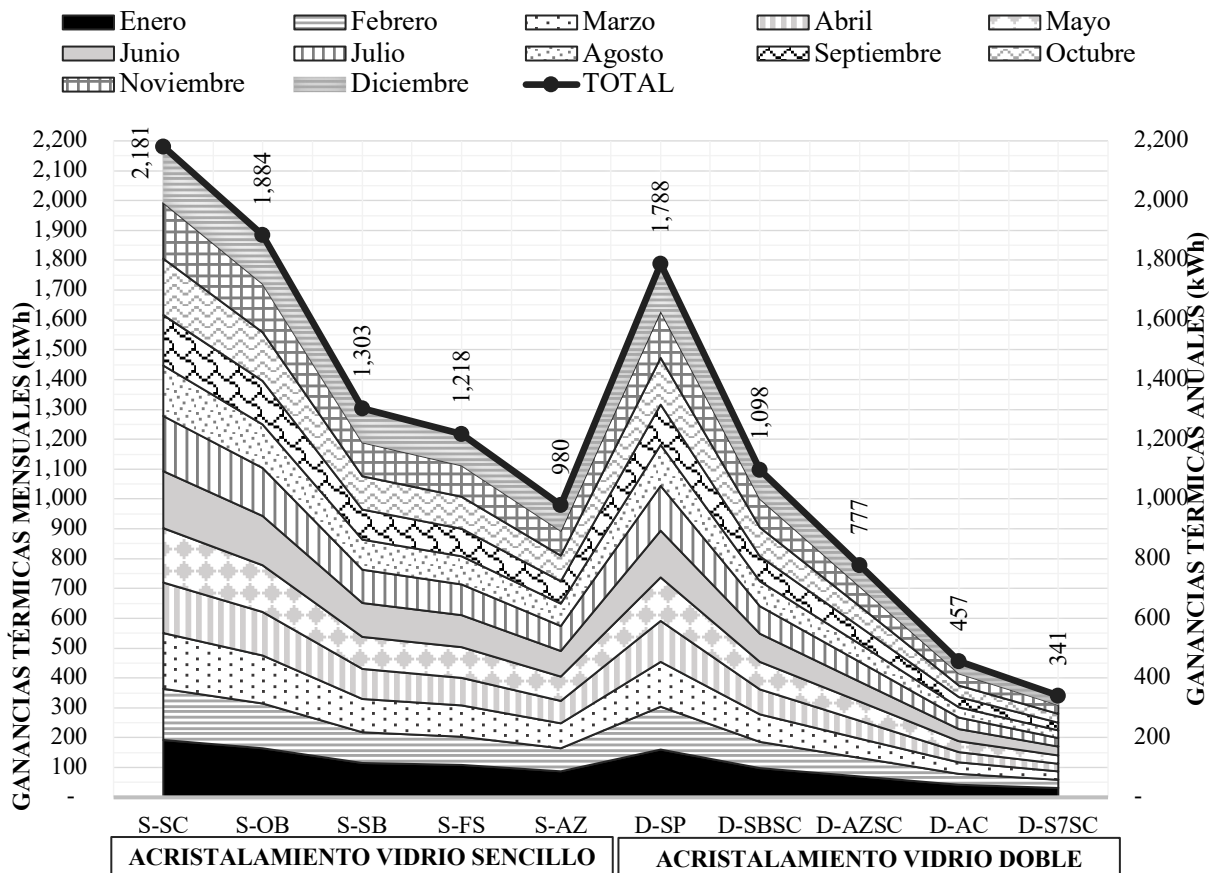


Figura 9. Ganancia térmica mensual, con diferentes tipos de vidrio en la envolvente.



No obstante, la propiedad U del material fue de apoyo para los sistemas de acristalamiento con menor CGCS, pero no suficiente para contrarrestar un alto LSG; tal fue el caso del sistema de acristalamiento D-SBSC que disminuyó en 50% la aportación de calor a pesar de tener el coeficiente U de valor más bajo (0.66), pero con valores de CGCS de 0.49 y LSG con valor de 1.02 que los posicionan a la media de la lista del resto de los valores.

Así pues, los sistemas de acristalamiento con minerales en su composición tienen mayores beneficios térmicos. Los resultados de la simulación arrojan un beneficio de hasta 6.4 veces menos ganancias térmicas con un vidrio recubrimiento triple plata (S7SC), respecto al caso base con vidrio claro. Otro de los vidrios con ventajas térmicas es el vidrio con bajo contenido de hierro (D-AC), el cual disminuye las ganancias térmicas, respecto al caso base en 4.7 veces.

Cabe recalcar, que las propiedades de transmitancia sobre CGCS de D-S7SC, es 2.4 veces mayor y las de D-AC 2.3 veces mayor, lo que representa que la recomendación de ASHRAE sobre propiedades de vidrio que funcionan para este tipo de clima, ya que a mayor transmitancia sobre CGCS, disminuye la ganancia de calor.

Por último, aquellos sistemas de acristalamiento que permitieron buena calidad de iluminación y menor aportación de calor fueron: S-AZ con 1.3 veces mayor transmitancia solar que CGSC, al aportar 373 lx anual y ganancia total anual de 980 kWh (55% menos que el caso base) y D-AC con 2.3 veces mayor transmitancia solar sobre CGCS, aporta 361 lx y disminuye 79% las aportaciones de calor en el espacio (a 457 kWh anual); los resultados específicos de cada sistema de acristalamiento y su correlación de iluminación natural y consumo energético, se puede observar en la figura 10.

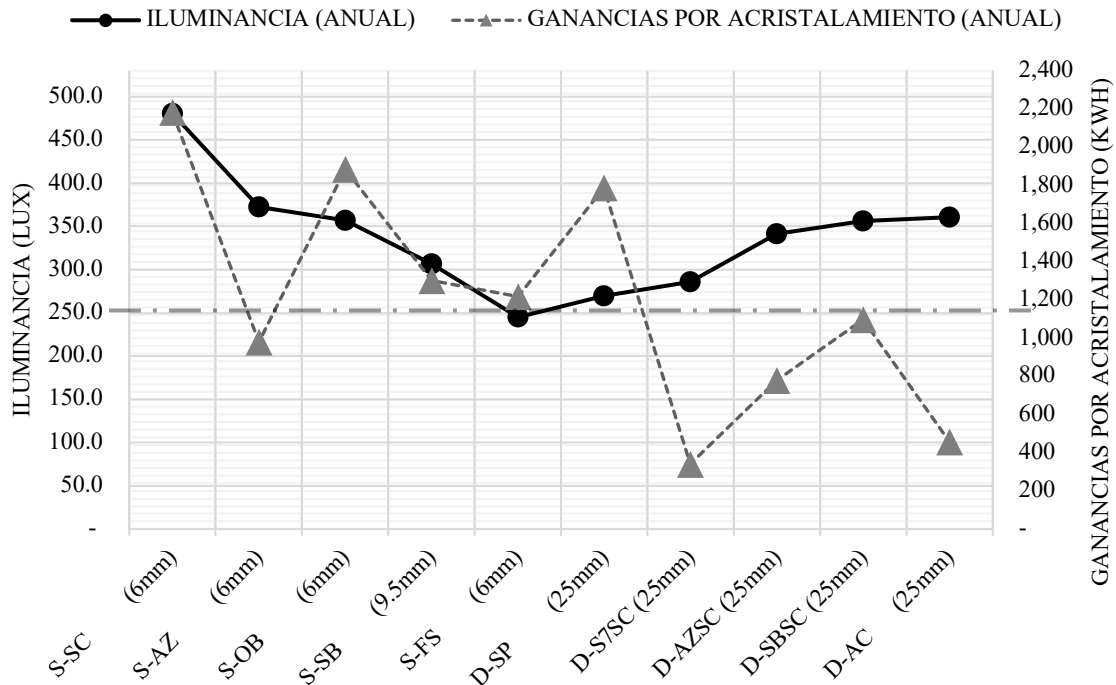


Figura 10. Relación de desempeño lumínico y térmico del edificio.



### 3.6 Validación empírica de simulación dinámica avanzada

La validación de simulación se realizó mediante la técnica de validación empírica [44]; esta, utiliza el parámetro de ASHRAE, 2017, que establece una diferencia máxima de 10% de Error Absoluto Promedio para métodos de calibración; así pues, al estimar la diferencia entre las 1,017 horas de datos de temperatura medidos en sitio contra los resultados de simulación, se obtuvo 8.6% de diferencia de TBS, con un promedio general de 19.95 °C de simulación contra 19.94 °C del monitor.

Además, se comparó el consumo de una semana de simulación contra los datos reales de cada espacio para determinar el porcentaje de diferencia entre conjunto de datos, y obtener así,

un modelo energético que cumpla con los criterios propuestos por ASHRAE, (2017), mostrados en la Tabla 1.

El resumen de la calibración entre los datos alimentados al simulador de iluminación, equipos y usuarios arrojó una diferencia de 1.8% más de carga por iluminación, es decir 0.30 kW; 0.2% más carga eléctrica por equipamiento (0.21 kW) y 0.6% menos aportación de calor por ocupación (0.1 kW), estos datos se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

De esta manera se valida el estudio respecto al desempeño termo-energético del edificio, así como los distintos tipos de acristalamiento.

Tabla 4. Calibración cargas internas mediante técnica de validación empírica

| ZONA              | POTENCIA | Iluminación General |           |       | Equipo eléctrico |           |      | Ocupación |           |       |
|-------------------|----------|---------------------|-----------|-------|------------------|-----------|------|-----------|-----------|-------|
|                   |          | SIM                 | LEV. FIS. | DIF.  | SIM              | LEV. FIS. | DIF. | SIM       | LEV. FIS. | DIF.  |
| PLANTA BAJA       | kW       | 8.5                 | 8.2       | 0.3   | 54.3             | 54.1      | 0.2  | 7.7       | 7.7       | - 0.1 |
|                   | %        | 104%                | 100%      | 3.8%  | 100%             | 100%      | 0.3% | 99%       | 100%      | -0.8% |
| PLANTA ALTA       | kW       | 2.6                 | 2.6       | 0.0   | 34.1             | 34.1      | 0.0  | 3.9       | 3.9       | 0.0   |
|                   | %        | 100%                | 100%      | -0.1% | 100%             | 100%      | 0.1% | 100%      | 100%      | -0.3% |
| EDIFICIO COMPLETO | kW       | 11.11               | 10.81     | 0.3   | 88.41            | 88.20     | 0.2  | 11.51     | 11.59     | - 0.1 |
|                   | %        | 102%                | 100%      | 1.8%  | 100%             | 100%      | 0.2% | 99%       | 100%      | -0.6% |

SIM: Datos por simulación, LEV.FIS: Datos por levantamiento físico, DIF: Diferencia entre datos simulados y LEV.FIS

### 4. Conclusiones

Los cambios de la posición del sol en los días analizados tienen un efecto positivo mayor sobre la fachada norte ya que a mayor altitud y radiación solar, la iluminación de los espacios es mayor, sin embargo, una menor altitud beneficia a las ventanas en la fachada sur.

Las zonas más afectadas se encuentran situadas en la fachada sur, ya que son los espacios con menor relación de V-M y V-S, estos solo iluminan entre el 5% y 10% de área de suelo para las 3 posiciones solares analizadas; lo que concuerda que para esta orientación el estudio de Shaeri et al. (2019) se puede aplicar en esta ubicación geográfica.



Las zonas ubicadas en fachada norte tienen mayores beneficios principalmente por la radiación solar indirecta, sin embargo, la relación de V-M de las zonas mejor iluminada es complementada por la relación V-S de dichos espacios, esto representa que el 20% de V-M establecido por Shaeri et al. (2019), es solo un factor que proporciona iluminación óptima, y que la forma y posición de la ventana tiene un efecto directo para que la relación V-S, sea otro factor que influye al analizar el espacio.

La zona V1 es la mejor iluminada al cumplir con la norma mexicana y los estándares internacionales durante los días de cielo claro, su relación V-M y V-S es mayor al 20%, lo que establece una relación con el estudio de Shaeri, et al. (2019), sin embargo, hay otras zonas con iluminación óptima que tienen su vano posicionado al centro del muro sin importar la relación V-M.

Las zonas O2, O3, O4, O5 cumplen con la norma mexicana, al tener un promedio entre el rango de 300 lx a 900 lx, sin embargo, su relación V-M y V-S no permiten que cumpla con los estándares internacionales en todos los casos.

La forma rectangular vertical es mejor para aquellas zonas en las que el área de suelo tiene más profundidad, aquellas con rectangular horizontal son mejores para espacios más anchos que profundos, sin embargo, para vanos con dimensiones pequeñas (con relación V-M menor) la posición centrada a muro permite una iluminación del espacio más uniforme, independientemente de la forma del vano.

Los elementos de sombreado juegan un papel importante para el deslumbramiento en los espacios, ya que, si la proporción es adecuada al tamaño de la ventana, evita que la zona evaluada tenga un exceso de ganancias de calor.

El vidrio con mayor iluminación es el S-SC con transmitancia de 85%, ya que se obtienen 550 lx en el mejor escenario analizado del 21 de junio y de 498 lx en el caso promedio de 21 de marzo.

El vidrio con transmitancia de 41% S-FS (tinte gris), proporciona menor iluminación natural, ya que solo permite 255 lx para el caso del 21 de marzo.

El vidrio S-SB de espesor de vidrio sencillo de 9.5 mm y transmitancia de 41%, tiene un tinte azul cielo brillante y comparado con el mejor y peor escenario de iluminación, disminuye la iluminación natural a 318 lx 80% más que el peor caso.

El vidrio base S-SC con CGCS 0.82, tiene las mayores ganancias de calor y se requiere de un consumo energético anual de 2,181 kWh, mientras que el vidrio D-AC con CGCS de 0.23, disminuye las ganancias de calor por acristalamiento en 79%, ya que el consumo de energía por climatización se reduce a 457 kWh anuales.

El mejor sistema de acristalamiento para iluminación natural es el vidrio S-AC (vidrio sencillo tinte azul turquesa), ya que mantiene la iluminación 22% debajo del caso base y disminuye en 55% las ganancias de calor por acristalamiento.

El mejor sistema de acristalamiento para disminuir ganancias de calor es el vidrio D-S7SC (vidrio Low-E ultra claro), ya que disminuye estas ganancias en 84%, pero disminuye la iluminación natural en 41%, esto es un promedio de 286 lx, ligeramente por debajo de la norma mexicana.

Aquel sistema de acristalamiento sencillo que permite una mejor condición termo-energética es el S-AZ (tinte azul turquesa) ya que disminuye



las ganancias de calor en 55% y permite cumplir con la norma mexicana con un promedio de 373 lx.

El sistema de acristalamiento doble con mejor condición termo-energética es el D-AC (vidrio con bajo contenido en hierro), ya que mantiene una iluminación promedio de 361 lx y disminuye en 79% las ganancias de calor.

Se requiere continuar el estudio para modificar la relación V-S, V-M y forma del vano para establecer si realmente el vidrio tintado azul turquesa permite mejor iluminación que los sistemas de acristalamiento doble. Asimismo, si el espesor del vidrio tiene un efecto significativo para reducir las ganancias de calor en vidrios sencillos.

Además, un análisis de iluminación artificial en el que se establezca que, cuando la iluminación natural llegue a 300 lx, el sistema de iluminación artificial se apague, permitirá estimar el ahorro energético por iluminación artificial.

Finalmente, analizar el tamaño óptimo de los elementos de sombreado permitirá evitar deslumbramiento en los espacios.

Para concluir, este estudio permitió entender que es posible lograr iluminación natural óptima para climas cálido seco extremosos, y reducir las ganancias de calor en el espacio si se usa el sistema de acristalamiento ideal al espacio.

## 5. Agradecimientos

Agradecimientos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo financiero para la realización del programa de posgrado en investigación; al programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño por la formación, por último, más no menos

importante, a la empresa IBRS Consultores por permitir el acceso a sus instalaciones como caso de estudio.

## Referencias

- [1] Instituto Well del Bienestar [IWB], "WELL Building Standard v2". Well Building Institute, 2019. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- [2] M. Canazei, W. Pohl, H. R. Bliem, M. Martini, y E. M. Weiss, "Artificial skylight effects in a windowless office environment", *Building and Environment*, vol. 124, pp. 69-77, nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.045>
- [3] X. Chen, X. Zhang, y J. Du, "Glazing type (colour and transmittance), daylighting, and human performances at a workspace: A full-scale experiment in Beijing", *Building and Environment*, vol. 153, pp. 168-185, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.034>
- [4] M. Vieira Dias, A. Motamed, P. Sergio Scarazzato, y J.-L. Scartezzini, "Toward proper evaluation of light dose in indoor office environment by frontal lux meter", *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 835-840, sep. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.418>
- [5] A. Jamrozik et al., "Access to daylight and view in an office improves cognitive performance and satisfaction and reduces eyestrain: A controlled crossover study", *Building and Environment*, vol. 165, p. 106379, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106379>
- [6] C. Baglivo, M. Bonomolo, M. Beccali, y P. [Maria Congedo, "Sizing analysis of interior lighting using tubular daylighting devices", *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 179-186, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.138>
- [7] A. Al-Hemoud, L. Al-Awadi, A. Al-Khayat, y W. Behbehani, "Streamlining IAQ guidelines and investigating the effect of door opening/closing on concentrations of VOCs, formaldehyde, and NO2 in office buildings", *Building and Environment*, vol. 137, pp. 127-137, jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.029>
- [8] I. Turan, A. Chegut, D. Fink, y C. Reinhart, "The value of daylight in office spaces", *Building and Environment*, vol. 168, p. 106503, ene. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106503>



- [9] C. Navarro, "Sistematización y análisis de metodologías cualitativas para evaluar percepción social sobre adaptación al cambio climático: Informe final", INECC-CONACYT, Ciudad de México, 2017. [En línea]. Disponible en: [http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/50/736\\_2017\\_Sistematizacion\\_analisis\\_metodologias\\_adaptacion\\_CC.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/50/736_2017_Sistematizacion_analisis_metodologias_adaptacion_CC.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [10] M. A. Fasi y I. M. Budaiwi, "Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates", *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 307-316, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.024>
- [11] A. Abdul, M. Abdul, y M. Ismail, "Relationship between Indoor Environmental Quality (IEQ), Occupant's Satisfaction and Productivity in GBI Rated Office Building using SEM-PLS", *Pertanika Journal of Social Sciences & Humanities*, vol. 25 S, p. 319, ene. 2017.
- [12] H. J. Han et al., "An advanced lighting system combining solar and an artificial light source for constant illumination and energy saving in buildings", *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109404, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109404>
- [13] Y. Fang y S. Cho, "Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance", *Solar Energy*, vol. 191, pp. 7-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>
- [14] J. Potočnik y K. Mitja, "Influence of commercial glazing and wall colours on the resulting non-visual daylight conditions of an office", *Building and Environment*, vol. 171, p. 106627, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106627>
- [15] S. Vaisi y F. Kharvari, "Evaluation of Daylight regulations in buildings using daylight factor analysis method by radiance", *Energy for Sustainable Development*, vol. 49, pp. 100-108, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.002>
- [16] P. Pilechiha, M. Mahdavejad, F. Pour Rahimian, P. Carnemolla, y S. Seyedzadeh, "Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency", *Applied Energy*, vol. 261, p. 114356, mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>
- [17] J. Ávila-Delgado, M. D. Robador, y J. A. Barrera-Vera, "Glazing selection procedure for office building retrofitting in the Mediterranean climate in Spain", *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101448, ene. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101448>
- [18] F. F. Hernández, J. M. López, J. M. Suárez, M. C. Muriano, y S. C. Rueda, "Effects of louvers shading devices on visual comfort and energy demand of an office building. A case of study", *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 207-216, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.136>
- [19] E. F. Triantafyllidou y A. G. Michael, "The impact of installing a concave curved profile blind to a glass window for visual comfort in office buildings", *Procedia Manufacturing*, vol. 44, pp. 269-276, ene. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.231>
- [20] D. Uribe, S. Vera, W. Bustamante, A. McNeil, y G. Flamant, "Impact of different control strategies of perforated curved louvers on the visual comfort and energy consumption of office buildings in different climates", *Solar Energy*, vol. 190, pp. 495-510, sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.027>
- [21] R. Azari, S. Garshasbi, P. Amini, H. Rashed-Ali, y Y. Mohammadi, "Multi-objective optimization of building envelope design for life cycle environmental performance", *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 524-534, ago. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.054>
- [22] L. Troup, R. Phillips, M. J. Eckelman, y D. Fannon, "Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings", *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109434, nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
- [23] J. Shaeri, A. Habibi, M. Yaghoubi, y A. Chokhachian, "The Optimum Window-to-Wall Ratio in Office Buildings for Hot-Humid, Hot-Dry, and Cold Climates in Iran", *Environments*, vol. 6, núm. 4, p. 45, abr. 2019. <https://doi.org/10.3390/environments6040045>
- [24] Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción Refrigeración y Aire Acondicionado [ASHRAE], *ASHRAE Handbook*. 2013. Consultado: ene. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEC1/2013-ashrae-handbook>



- [25] "Determination of optimal energy-efficient integrated daylighting systems into building windows", *Solar Energy*, vol. 209, pp. 258-277, oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.086>
- [26] R. Phillips, L. Troup, D. Fannon, y M. J. Eckelman, "Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings", *Building and Environment*, vol. 182, p. 107057, sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107057>
- [27] G. Feng, D. Chi, X. Xu, B. Dou, Y. Sun, y Y. Fu, "Study on the Influence of Window-wall Ratio on the Energy Consumption of Nearly Zero Energy Buildings", *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 730-737, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.003>
- [28] Ramírez, "Análisis comparativo de la calidad de la iluminación Interior de espacios escolares en función de la proporción vano muro: 2 casos de estudio en la UAM Azcapotzalco", Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información., 2017. Consultado: ene. 08, 2021. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5992>
- [29] Instituto Mexicano para la Competitividad A.C, "Índices del IMCO", 2016. <https://imco.org.mx/indices/el-estado-los-estados-y-la-gente/capitulos/el-estado-los-estados-y-la-gente/eficiencia-energetica> (consultado may 26, 2020).
- [30] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-024-ENER-2012", 2012. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5273553](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5273553) (consultado nov. 25, 2019).
- [31] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-030-ENER-2016", 2016. [http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6353/sener11\\_C/sener11\\_C.html](http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6353/sener11_C/sener11_C.html) (consultado nov. 25, 2019).
- [32] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-035-STPS-2018", 2018. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23/10/2018) (consultado nov. 25, 2019).
- [33] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-025-STPS-2008", 2015. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5404572&fecha=20/08/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404572&fecha=20/08/2015) (consultado nov. 25, 2019).
- [34] Organización Internacional de Normalización [ISO], "ISO 5725-1:1994(en), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions". <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:en> (consultado oct. 13, 2020).
- [35] T. Lawrence, A. Darwich, y J. Means, ASHRAE GreenGuide: Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings, vol. 5. 2018. Consultado: jun. 08, 2020. [En línea]. Disponible en: [http://eds.a.ebscohost.com/eds/ebookviewer/ebook/bmxl\\_YmtfXzE4MjEzMzZfX0FO0?nobk=y&sid=cb86cdd8-95d3-49d1-99b1-8482d06c5f94@sessionmgr4007&vid=8&format=EB&lp\\_id=lp\\_vii&rid=0](http://eds.a.ebscohost.com/eds/ebookviewer/ebook/bmxl_YmtfXzE4MjEzMzZfX0FO0?nobk=y&sid=cb86cdd8-95d3-49d1-99b1-8482d06c5f94@sessionmgr4007&vid=8&format=EB&lp_id=lp_vii&rid=0)
- [36] Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos [GBCI], "LEED v4 for interior design and construction", US Green Building Council, Estados Unidos, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED\\_v4\\_IDC\\_07.25.19\\_current.pdf](https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED_v4_IDC_07.25.19_current.pdf)
- [37] S. Arias y D. Ávila, La iluminación natural en la arquitectura: en climas semitemplados. Guadalajara, Jalisco: Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño: Centro de Investigaciones en Ergonomía, 2004.
- [38] G. Rodríguez y Á. Francisco, "Proceso de estudio de iluminación natural para garantizar el confort lumínico en espacios interiores en la ciudad de Quito.", 2018, Consultado: nov. 18, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/15359>
- [39] C. Resende, H. Artur, y A. Pinto, "Analysis of the influence of soil in the thermal performance of subterranean rooms in a ground-level building in São Paulo, Brazil, via EnergyPlus", *INGENIARE - Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 28, núm. 1, pp. 164-177, mar. 2020. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000100164>
- [40] A. García, "Manual de ayuda DesignBuilder en español". DesignBuilder, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.designbuilder-lat.com/soporte/manual-de-ayuda>
- [41] M. N. Assimakopoulos, N. Barmpareos, A. Pantazaras, T. Karlessi, y S. E. Lee, "On the comparison of occupancy in relation to energy consumption and indoor environmental quality: a case study", *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 875-884, oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.548>



[42] I. E. Bennet y W. O'Brien, "Office building plug and light loads: Comparison of a multi-tenant office tower to conventional assumptions", *Energy and Buildings*, vol. 153, pp. 461-475, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.050>

[43] Nadji, Mokhtari, y Slimani, "The natural lighting for energy saving and visual comfort in collective housing: A case study in the Algerian building context", *Journal of Building Engineering*, vol. 24, p. 100760, jul. 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100760>

[44] Vitro Vidrio Arquitectónico, "Fichas Técnicas", 2020.  
<https://www.vitroglazings.com/es/informacion-tecnica/fichas-tecnicas/> (consultado ene. 06, 2021).



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)





# La ciudad desde la mirada de migrantes, refugiados y desplazados: equipamiento urbano y habitabilidad para la frontera norte de México

*The city from the point of view of migrants, refugees and displaced persons: urban facilities and habitability for the northern border of Mexico*

Berenice Vizcarra 

Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

**Autor de correspondencia:** Berenice Vizcarra, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México. E-mail: [vizcarra.luz@uabc.edu.mx](mailto:vizcarra.luz@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0002-5984-0755.

**Recibido:** 23 de Marzo del 2021

**Aceptado:** 3 de Agosto del 2021

**Publicado:** 30 de Agosto del 2021

**Resumen.** - El siglo XXI se ha visto marcado por las numerosas movilizaciones migrantes, ya sea por circunstancias bélicas, medio ambientales, políticas, culturales o económicas. Puntualmente, la crisis migratoria que se presenta en la frontera norte de México ha puesto sobre la mesa la urgencia de contar con equipamiento e infraestructura suficiente y adecuada para cubrir las necesidades de los recién llegados. El déficit de servicios y entidades básicas para atender estos fenómenos socio-urbanos agrava las posibilidades de encontrar vivienda provisional, asesoría legal o atención médica y psicológica; además de dificultar la obtención de ingresos y la integración a las dinámicas sociales y culturales de la localidad, entre otras condiciones favorables para la habitabilidad. Al respecto, la Organización de las Naciones Unidas señala, dentro de la Nueva Agenda Urbana, la importancia de crear asentamientos humanos accesibles, que garanticen el respeto a los derechos humanos de quienes se han visto forzados a desplazarse. Entonces, si a las ciudades contemporáneas se les refiere coloquialmente como “selvas de concreto”, puesto que en ellas se manifiesta un desarrollo espacial complejo, cómo serían percibidas las problemáticas diarias de movilidad, infraestructura y habitabilidad urbana desde las circunstancias particulares de vulnerabilidad, inseguridad e incertidumbre que atraviesan migrantes y refugiados. Será que las ciudades fronterizas mexicanas están preparadas para su recepción. El siguiente escrito tiene la finalidad de presentar un avance en el proyecto de investigación titulado “Habitabilidad y equipamiento para la frontera norte de México, que tiene como parte de sus objetivos el interpretar las condiciones en que se da la crisis migratoria particularmente en la ciudad capital de Mexicali, Baja California. Para ello, el proyecto privilegia el enfoque cualitativo al identificar, documentar, analizar y evaluar todo aquello que atañe a los asentamientos humanos y reconocer los aspectos tanto urbanísticos como socioculturales del fenómeno.

**Palabras clave:** Frontera; Migración; Habitabilidad; Equipamiento; Sustentabilidad.

**Abstract.** - The 21st century has been marked by numerous migrant mobilizations, whether due to warlike, environmental, political, cultural, or economic circumstances. Specifically, the migratory crisis that occurs on the northern border of Mexico has put on the table the urgency of having sufficient and adequate equipment and infrastructure to meet the needs of the newcomers. The deficit of services and basic entities to attend to these socio-urban phenomena aggravates the possibilities of finding temporary housing, legal advice, or medical and psychological attention; in addition to making, it difficult to obtain income and integration into the social and cultural dynamics of the locality, among other favorable conditions for habitability. In this regard, the United Nations Organization points out, within the New Urban Agenda, the importance of creating accessible human settlements, which guarantee respect for the human rights of those who have been forced to displace. So, if contemporary cities are colloquially referred to as “concrete jungles” since a complex spatial development is manifested in them, how would the daily problems of mobility, infrastructure, and urban habitability be perceived from the particular circumstances of vulnerability, insecurity, and uncertainty experienced by migrants and refugees. It will be that the Mexican border cities are prepared for its reception. The purpose of the following writing is to present an advance in the research project entitled “Habitability and equipment for the northern border of Mexico, which has as part of its objectives to interpret the conditions in which the migratory crisis occurs, particularly in the capital city from Mexicali, Baja California. For this, the project privileges the qualitative approach by identifying, documenting, analyzing, and evaluating everything that concerns human settlements and recognizing both the urban and socio-cultural aspects of the phenomenon.

**Keywords:** Border; Migration; Habitability; Equipment; Sustainability.



## 1. Introducción: acerca del fenómeno migratorio

El siglo XXI se ha visto marcado por las numerosas movilizaciones migrantes, ya sea por circunstancias bélicas, medio ambientales, políticas, culturales o económicas. Por su proximidad y gravedad de condiciones destaca la movilización saliente de El Salvador, Guatemala y Honduras, el llamado Triángulo del Norte; un tema que ha resultado ser de interés internacional por sus consecuencias que van desde lo financiero hasta la salud pública, y que tienen como detonante a la violencia:

Los desplazamientos de población centroamericana que a través de México llegan a EEUU no son nuevos y han sido profusamente documentados los últimos años. En los flujos actuales, la diferencia radica en que la violencia ejercida por las maras y otros grupos criminales se ha convertido en un factor generador de emigración. [1]

Puntualmente, la crisis migratoria que se presenta en la frontera norte de México ha puesto sobre la mesa la urgencia de contar con equipamiento e infraestructura suficiente y adecuada para cubrir las necesidades de los recién llegados. Los registros censales más recientes manifiestan la trascendencia de esta situación; por ejemplo, “la ENADID 2018, estima que un millón 74 mil personas que radican en México nacieron en otro país. De estos, 40% residen en las entidades fronterizas con los Estados Unidos” [2]. Entre dichas entidades, Baja California, suele ser el destino de distintas movilizaciones por colindar con California, uno de los estados más productivos y reconocidos de la unión

americana; de manera que, para el 2020, la población total inmigrante de Baja California correspondió al 38.84% de la población total de ese territorio y al 6.77% de la población total inmigrante en todo el país [3].

Si bien el municipio de Tijuana es conocido por su gran afluencia turística y migratoria, en esta ocasión la ciudad de Mexicali – capital de Baja California– será el polígono urbano y social por estudiar, debido a la interesante dualidad entre el creciente arribo de población en tránsito, al ser esta zona uno de los puntos de deportación desde los Estados Unidos; y las deficientes decisiones de planeación urbana que se reflejan en la correspondencia entre la estructura urbana y la dotación de equipamiento dirigido a la población migrante.

Aunado a la carga sociocultural implícita, lo anterior es pertinente de estudiar si se toma en cuenta que los proyectos públicos recientes adoptan como estandarte los orígenes multiculturales de la localidad, sin necesariamente integrar los requerimientos básicos de las movilizaciones contemporáneas. Con ello dígame la apertura del ‘Museo de la comida china en Mexicali’ en contraste con la ‘rehabilitación de la plaza del Mariachi’, espacio público conocido ser punto de encuentro de población migrante y personas en situación de calle que a partir del inicio del proyecto han sido desplazados –una vez más– argumentando que las autoridades locales “rescatarán este espacio para devolvérselo a las familias mexicalenses” [4].



Ahora bien, la Organización de las Naciones Unidas señala, dentro de la Nueva Agenda Urbana, la importancia de crear asentamientos humanos accesibles, que garanticen el respeto a los derechos humanos de quienes se han visto forzados a desplazarse. Con ello, el artículo 28 cita: “Nos comprometemos a asegurar el pleno respecto de los derechos humanos de los refugiados, los desplazados internos y los migrantes, con independencia de su situación migratoria, y a brindar apoyo a las ciudades que los acogen en el espíritu de la cooperación internacional” [5]. Mientras que el artículo 34 marca que:

Nos comprometemos a promover el acceso equitativo y asequible a la infraestructura física y social básica sostenible para todos [...] Nos comprometemos también a velar por que esos servicios tengan en cuenta los derechos y las necesidades de las mujeres, los niños y los jóvenes, las personas de edad y las personas con discapacidad, los migrantes, los pueblos indígenas y las comunidades locales, según proceda, y los de otras personas en situaciones de vulnerabilidad. A este respecto, alentamos la eliminación de barreras jurídicas, institucionales, socioeconómicas y físicas [6].

El siguiente escrito tiene la finalidad de presentar un avance en el proyecto de investigación titulado ‘Habitabilidad y equipamiento para la frontera norte de México’, que tiene como parte de sus objetivos el interpretar las condiciones en que se da la crisis migratoria en la ciudad capital de Mexicali, Baja California; apoyándose en el supuesto de que la oferta de equipamiento adecuado contribuirá en la mejora de las condiciones de vida de la población en tránsito y propiciará la

multiculturalidad en la franja fronteriza del norte de México.

En esta primera etapa, el proyecto privilegia el enfoque cualitativo al identificar, documentar, analizar y evaluar todo aquello que atañe a los asentamientos humanos y reconocer los aspectos tanto urbanísticos como socioculturales del fenómeno. Al mismo tiempo, la construcción de datos visuales será medular para la articulación de lo urbano-espacial con lo sociocultural, una situación importante dentro del marco metodológico en el que espacio e imagen se verán asociados.

Es importante comentar que el proyecto de investigación general cuenta con una segunda etapa que pretende identificar las características de la evolución urbana de Mexicali con respecto a la crisis migratoria, tomando como área de estudio al centro fundacional de la ciudad, y con ello propiciar un programa de necesidades habitacionales, de equipamiento e infraestructura que considere las preexistencias urbanas y arquitectónicas. En ambas etapas la investigación será exploratoria, dado que los antecedentes regionales con respecto a la relación entre los conceptos de habitabilidad, equipamiento y migración son escasos.

## **2. Metodología: interdisciplinariedad para el trabajo con datos cualitativos**

Las múltiples realidades que se presentan a partir del fenómeno migratorio en la frontera norte mexicana, donde las interacciones socioculturales se vinculan con un entorno espacial determinado, propicia un cruce disciplinar el cual permita la inclusión de un análisis etnográfico, urbano, sociopolítico e incluso ecológico, lo



que requerirá de los aportes de los estudios culturales, de planeación urbana y el desarrollo sostenible. Dicho esto, el diseño metodológico empleado para este proyecto de investigación se define como tipo no experimental y cumple con las etapas diferenciadas sugeridas por Taylor y Bogdan en cuanto al trabajo con los datos cualitativos:

La primera es una fase de descubrimiento en progreso: identificar temas y desarrollar conceptos y proposiciones. La segunda fase, que típicamente se produce cuando los datos ya han sido recogidos, incluye la codificación de los datos y el refinamiento de la comprensión del tema de estudio. En la fase final, el investigador trata de relativizar sus descubrimientos (Deutscher, 1973), es decir, de comprender los datos en el contexto en que fueron recogidos [7].

Dado que el principal propósito de este escrito es interpretar las condiciones en que se da la crisis migratoria en la ciudad de Mexicali, mediante la documentación y el análisis particular de todo aquello que atañe a la asistencia para la población migrante, lo que engloba el reconocimiento de los aspectos tanto urbanísticos como socioculturales del fenómeno, será necesario comenzar por la definición de los conceptos básicos del estudio.

1. Crisis migratoria: dando por entendido que la frontera norte de México es el territorio que representa la mayor puerta de entrada hacia los EUA, es aquí donde converge una población por de más vulnerable de connacionales, extranjeros, apátridas, deportados, solicitantes de asilo, refugiados, sobrevivientes de violencia o personas en movilidad. La situación se agrava cuando los servicios y entidades

básicas son insuficientes, imposibilitando el digno tránsito por la localidad, así como una adecuada integración a las dinámicas sociales y culturales.

2. Equipamiento urbano: “la Ley de Desarrollo Urbano de Baja California define al Equipamiento Urbano como ‘El conjunto de espacios y edificaciones de uso predominantemente público, donde se proporciona un servicio a la población que contribuye a su bienestar y desarrollo económico social y cultural’” [8]. Mientras que se conoce como Asistencia Integral, a los servicios de emergencia médica, jurídica, social, psicológica, así como otros necesarios según sea el caso, a decir de la Comisión Ejecutiva de Atención a Víctimas [9]. Queda sobre entendido que para fines del escrito se mencionará al equipamiento urbano como aquel dirigido especialmente a la población migrante.

3. Habitabilidad: sin lugar a duda, uno de los conceptos más complejos y largamente estudiados desde la arquitectura y la filosofía posmoderna, por lo que no será prioridad aquí la discusión –ni la elaboración– de sus acepciones. Para los fines de este proyecto de investigación, el término se ceñirá a las condiciones socioespaciales y culturales a las que se enfrenta la población migrante, y se entenderá como la cualidad de un medio ambiente apto, adecuado para ser habitable y acondicionado para las necesidades específicas ante la crisis migratoria.

Si bien el diseño metodológico de la investigación se ha procurado flexible, es decir, que “alude a la posibilidad de advertir durante el proceso de investigación situaciones nuevas e inesperadas vinculadas con el tema de estudio, que puedan implicar



cambios” [10]; la amplitud de los conceptos antes definidos han posibilitado la delimitación de subcategorías – ejemplificado en la matriz de códigos y categorías (cuadro 1)– con la finalidad de apoyar la codificación de datos recabados y propiciar la interpretación triangulada y fidedigna de los resultados; así “desde el inicio de la investigación la recolección de datos, el análisis, la interpretación, la teoría, se dan conjuntamente, y esta ida y vuelta entre los datos y la teorización permite generar interactivamente conocimientos fundado en los datos” [11].

Por lo anterior, vale la pena señalar que durante la segunda etapa del proyecto de investigación se profundizará el abordaje de otros conceptos relevantes para el alcance general, como lo son: multiculturalidad, sustentabilidad social y la relación de estos con la planeación urbana. De la misma manera, se tiene contemplado que la matriz de códigos que auxilie en la interpretación de datos cualitativos aumente y se recategorice con respecto a los tópicos de estudio agregados.

Del concepto de crisis migratoria se desprenden dos categorías de análisis. Por un lado, aquella que nos permite reconocer los aspectos sociopolíticos del fenómeno migratorio, como la procedencia de las personas de interés y el nivel de intervención de las autoridades locales mediante políticas y programas públicos. Por otro lado, ofrece un estimado de la capacidad receptiva de la ciudad a partir de su estructura urbana, incluyendo la fiabilidad de reconocimiento del contexto,

la relevancia de la ubicación de los servicios y la capacidad de movilidad por parte de los foráneos. En conjunto, ambas categorías brindan un panorama general del fenómeno en la frontera norte de México, propio del comienzo de la segunda década del siglo XXI.

Por su parte, la categoría de análisis que surge consiguiente del concepto de equipamiento urbano comprende el vínculo de los servicios de asistencia integral con las personas de interés –en este caso la población desplazada, refugiada o deportada– y facilita los datos cuantificables con respecto a los elementos arquitectónicos y espaciales del equipamiento urbano. Finalmente, el concepto de habitabilidad se vincula, a su vez, con los aspectos subjetivos, propios de la producción multicultural en el espacio, como la transformación de prácticas, la adaptación al medio ambiente y la percepción de los locales.

Dada la perspectiva teórica del proyecto, en esta primera parte del proyecto de investigación, los datos serán recuperados predominantemente mediante de una serie de técnicas derivadas del análisis visual, como las entrevistas narrativas, la observación directa y la revisión ciber-hemerográfica. No obstante, en una segunda etapa del proyecto se recurrirá a información estadística, georreferenciada y cartográfica, que en conjunto brindarán una perspectiva más amplia de la problemática estudiada.



Tabla 1. Matriz de códigos y categorías

| Concepto            | Categoría               | Código                                      | Observables  |
|---------------------|-------------------------|---|--|
| Crisis migratoria   | Aspectos sociopolíticos | Procedencia                                 | Origen, destino. Motivo de la estadía. Circunstancias del arribo.  |
|                     |                         | Políticas públicas                          | Postura nacional e internacional. Programas de apoyo. Proyectos locales.   |
|                     | Estructura urbana       | Reconocimiento del contexto                 | Orientación en la ciudad. Localización de los hitos. Ubicación del equipamiento.   |
|                     |                         | Acceso al equipamiento                      | Relevancia de la ubicación. Proximidad entre inmuebles. Facilidad de acceso.   |
|                     |                         | Movilidad y conectividad                    | Transporte público. Estructura vial. Calles completas.   |
| Equipamiento urbano | Asistencia social       | Asistencia integral                         | Tipo de asistencia. Características y necesidades de las instituciones públicas y asociaciones civiles.                              |
|                     |                         | Pernoctación y aseo                         | Capacidades, restricciones, características y necesidades de los albergues.  |
|                     |                         | Espacios de convivencia                     | Localización, restricciones, características de parques, plazas y espacios públicos.   |
| Habitabilidad       | Espacio multicultural   | Percepción de los nativos                   | Negativos: prejuicios, estigmas, rechazos. Positivos: socialización, integración, convivencia, apoyo.                                |
|                     |                         | Prácticas socioculturales y socioespaciales | Adopción: del idioma, de las dinámicas sociales. Transformación: de los rituales urbanos. Adaptación: al medio ambiental y cultural. |

*Autoría propia, 2021*



Del concepto de crisis migratoria se desprenden dos categorías de análisis. Por un lado, aquella que nos permite reconocer los aspectos sociopolíticos del fenómeno migratorio, como la procedencia de las personas de interés y el nivel de intervención de las autoridades locales mediante políticas y programas públicos. Por otro lado, ofrece un estimado de la capacidad receptiva de la ciudad a partir de su estructura urbana, incluyendo la fiabilidad de reconocimiento del contexto, la relevancia de la ubicación de los servicios y la capacidad de movilidad por parte de los foráneos. En conjunto, ambas categorías brindan un panorama general del fenómeno en la frontera norte de México, propio del comienzo de la segunda década del siglo XXI.

Por su parte, la categoría de análisis que surge consiguiente del concepto de equipamiento urbano comprende el vínculo de los servicios de asistencia integral con las personas de interés –en este caso la población desplazada, refugiada o deportada– y facilita los datos cuantificables con respecto a los elementos arquitectónicos y espaciales del equipamiento urbano. Finalmente, el concepto de habitabilidad se vincula, a su vez, con los aspectos subjetivos, propios de la producción multicultural en el espacio, como la transformación de prácticas, la adaptación al medio ambiente y la percepción de los locales.

Dada la perspectiva teórica del proyecto, en esta primera parte del proyecto de investigación, los datos serán recuperados predominantemente mediante de una serie de técnicas derivadas del análisis visual, como las entrevistas narrativas, la observación directa y la revisión ciber-

hemerográfica. No obstante, en una segunda etapa del proyecto se recurrirá a información estadística, georreferenciada y cartográfica, que en conjunto brindarán una perspectiva más amplia de la problemática estudiada.

***a. Herramientas metodológicas: la ciudad desde la mirada de migrantes, refugiados y desplazados***

En esta etapa del proyecto se priorizó el uso de información cualitativa obtenida, particularmente, a través de entrevistas semiestructuradas y recorridos de observación, con el fin de contar con una aproximación de la realidad del fenómeno y alcanzar el objetivo general de interpretar las condiciones en que se da la crisis migratoria. Los datos recabados, fueron apoyados por información documental y de georreferenciación, tomando en consideración la interdisciplinariedad del trabajo.

Al llevar a cabo las entrevistas semiestructuradas, se tomó como universo a las instituciones y centros de atención dirigidos a la población migrante, entre ellos albergues y los sistemas de asistencia integral. Para obtener un muestreo amplio y confiable, primero se procedió a clasificar estos servicios; así, mediante un extenso sondeo se encontró que la ciudad de Mexicali cuenta con un estimado de 25 organismos, de los cuales 15 son albergues (ver cuadro 2). Ya que la clasificación de estos últimos es variada, se optó por solicitar el testimonio de los directores y/o encargados de: albergue Peregrino, albergue Maná, albergue Refugio del Hijo Pródigo, albergue Casa del Migrante Betania y Organización Haias México.



**Tabla 2.** Matriz de instituciones y centros de atención para el migrante

| <b>Tipo de servicio</b>  | <b>Nombre</b>                                  | <b>Clasificación</b> |
|--------------------------|--|----------------------|
| Albergue                 | Albergue peregrino                             | Público              |
| Albergue                 | Centro integral para el migrante               | Público              |
| Albergue                 | Hotel del migrante                             | Civil                |
| Albergue                 | Refugio del hijo prodigo A.C.                  | Civil                |
| Albergue                 | Hossana  | Civil                |
| Albergue                 | Alfa y omega                                   | Civil                |
| Albergue                 | Cobina   | Civil                |
| Albergue                 | Refugio para el migrante                       | Civil                |
| Albergue                 | Casa del migrante Betania                      | Religioso            |
| Albergue                 | Albergue maná                                  | Religioso            |
| Albergue                 | Asunción de María                              | Religioso            |
| Albergue                 | Once 94  | Religioso            |
| Albergue                 | Casa hogar de ángeles migrantes                | No definido          |
| Albergue                 | Albergue ver nuevo el mundo                    | No definido          |
| Albergue                 | Casa de recuperación rosita                    | No definido          |
| Asistencia integral      | Haias México                                   | Internacional        |
| Asistencia integral      | Dif municipal y estatal                        | Público              |
| Asistencia integral      | Centro estatal de los derechos humanos         | Público              |
| Asistencia integral      | Grupo de ayuda para el migrante                | No definido          |
| Asistencia especializada | Centro de atención violencia intrafamiliar     | Público              |
| Asistencia especializada | Centro de apoyo al trabajador migrante         | Público              |
| Asistencia especializada | Centro de información y asistencia a mexicanos | Público              |
| Asistencia especializada | Instituto para la mujer de Baja California     | Público              |
| Asistencia especializada | Corazón en las calles                          | Civil                |
| Asistencia especializada | Centro de hidratación para migrantes           | Civil                |

*Autoría propia, 2021.*

Las entrevistas semiestructuradas se almacenaron por medio de grabaciones de audio o video –según lo permitiera el caso, además de anotaciones en la bitácora del proyecto. Las semiestructura de las preguntas contó con cuatro grandes tópicos: 1) presentación y datos generales, como nombre y cargo del entrevistado, capacidades, restricciones y tipo de asistencia que brinda la organización; 2) relación del equipamiento con la estructura

urbana, incluyendo relevancia de la localización del inmueble, conectividad con otras instituciones y medio de transporte en el que arriban las personas en tránsito al albergue o centro de asistencia; 3) espacio multicultural, donde se le solicitaba al informante compartir sus experiencias sobre el choque de culturas, prácticas y proceso de adaptación de acuerdo a la procedencia de cada individuo; 4) aspectos particulares del equipamiento, donde se procuró llegar a un





cierre de la conversación con experiencias, necesidades y proyectos futuros de cada institución.

En cuanto a la dinámica de recorridos de observación se contemplaron tres puntos principales, derivados de su vinculación con la población migrante. El primer punto es el centro fundacional de Mexicali, integrado por la colonia Primera Sección, también considerado el centro histórico; el Río Nuevo, que hoy por hoy cuenta con una serie de infraestructura y equipamiento urbano regional; y la colonia popular Pueblo Nuevo, con disponibilidad de renta de vivienda accesible. Este polígono fue seleccionado por ubicar uno de los tres Puertos Fronterizos con EUA del municipio, por ser sede de un alto número de albergues e instituciones dirigida a la población migrante y, además, por contar con una fuerte carga histórica, tanto urbana-arquitectónica como de recepción de migrantes.

Se optó por las vías del ferrocarril como segundo punto de observación, al considerar que éstas son otra puerta de acceso en el peregrinar de las personas en tránsito migratorio. Aunado a ello, las vías del ferrocarril se despliegan de manera transversal a lo largo de la ciudad –de noroeste a sureste– acompañadas del bulevar Adolfo López Mateos, uno de los principales corredores comerciales de Mexicali. Finalmente, el tercer punto del recorrido de observación fueron los alrededores de los albergues y centros de atención; específicamente, aquellos que no se encontraran en los dos puntos anteriores. Ya que los recorridos no incluían una interacción del tipo ‘observación participante’, los datos obtenidos se registraron por medio de una bitácora y, en

menor medida, por un levantamiento fotográfico. Tanto las entrevistas como los recorridos de observación fueron guiados con la estructura de la matriz de conceptos, categorías, códigos y observables, recordemos pues que:

A lo largo del análisis, se trata de obtener una comprensión más profunda de lo que se ha estudiado, y se continúan refinando las interpretaciones. Los investigadores también se abrevan en su experiencia directa con escenarios, informantes y documentos, para llegar al sentido de los fenómenos partiendo de los datos [12].

Sumado a estos, se realizó una revisión documental, como se mencionó antes, mediante ciber-hemerografía local, regional, nacional e internacional. En total, se revisaron 50 reportajes de 20 periódicos distintos, fechados de 2018 hasta 2021, atendiendo llegar a una saturación de la información. Las notas se seleccionaron y clasificaron de acuerdo con las cuatro categorías derivadas de los conceptos de estudio, es decir: aspectos sociopolíticos de la crisis migratoria, que abarca temas de política migratoria y las políticas públicas; estructura urbana de Mexicali, en particular acerca de los proyectos urbanos en vigor; servicios dirigidos a la población migrante, que abordan tanto eventos particulares como noticias de interés general sobre las instalaciones; y multiculturalidad, procurando destacar las diversas realidades de los foráneos y los nativos.

Finalmente, se optó por vaciar parte de la información anterior por medio de recursos gráficos, puntualmente se hizo uso de la cartografía temática como herramienta metodológica para el análisis de los datos. En esta primera etapa del proyecto se



obtuvieron cuatro principales productos, el primer par dedicado a representar la localización de los albergues y centros de atención, así como su relación entre ellos y con otros elementos significativos en la ciudad, como lo son los Puertos Fronterizos y las vías ferroviarias (figura 1). El siguiente par, se concentra en el cruce de referencias con otros elementos del equipamiento urbano, como el transporte público y los espacios de esparcimiento, particularmente parques y plazas públicas (figura 2 y 3).

Se tiene contemplado que la información gráfica obtenida sea editada en forma de entregable y proporcionar estos datos ya procesados a las instituciones y usuarios que así lo requieran, con la intención de disminuir la incertidumbre del transeúnte que desconoce el trazo urbano de la ciudad y las ofertas de habitación temporal que se ofertan.

***b. Marco de interpretación: en busca de un desarrollo sustentable***

Como se mencionó al inicio de este apartado, los datos recabados se analizan a partir del cruce disciplinar de tres grandes áreas de estudio; haciendo uso de la interdisciplina que “consiste en la relación recíproca entre disciplinas en torno a un mismo problema [...] implica la transferencia de métodos de una disciplina a otra, así como el intercambio y colaboración entre los conocimientos teóricos y prácticos de distintas disciplinas” [13].

De esta manera, se emplea la sociología urbana, misma que “se centra sobre lo propiamente urbano de los diversos aspectos de la vida social; interroga sobre la manera en que los elementos que estructuran de manera específica las

relaciones entre actores, instituciones y grupos sociales constituyen a la ciudad como entorno” [14].

También se hará uso de la planeación urbana integrada a la sostenibilidad, donde la primera se considera “un proceso dinámico, cambiante, participativo, decisorio y flexible [...] dirigida a la solución de problemas a partir del reconocimiento de la diversidad, [...] sobre la base de considerar la importancia que reviste el escenario social y sus actores” [15]; y por tanto, “para que la planeación sea sostenible debe estar enfocada en aspectos sociales y ambientales [...] debe estar inscrita en un contexto estructurado y general, donde se tengan en cuenta factores e impactos en diversas escalas” [16].

Otra línea de conocimiento requerida es la sustentabilidad social, rama del desarrollo sostenible que aborda—entre otros aspectos—la equidad social, y con ello, el acceso a servicios y oportunidades [17]. En conjunto, las tres áreas de estudio harán posible llegar a una interpretación holística de la asociación entre equipamiento urbano y habitabilidad en el marco de la crisis migratoria en la frontera norte de México.

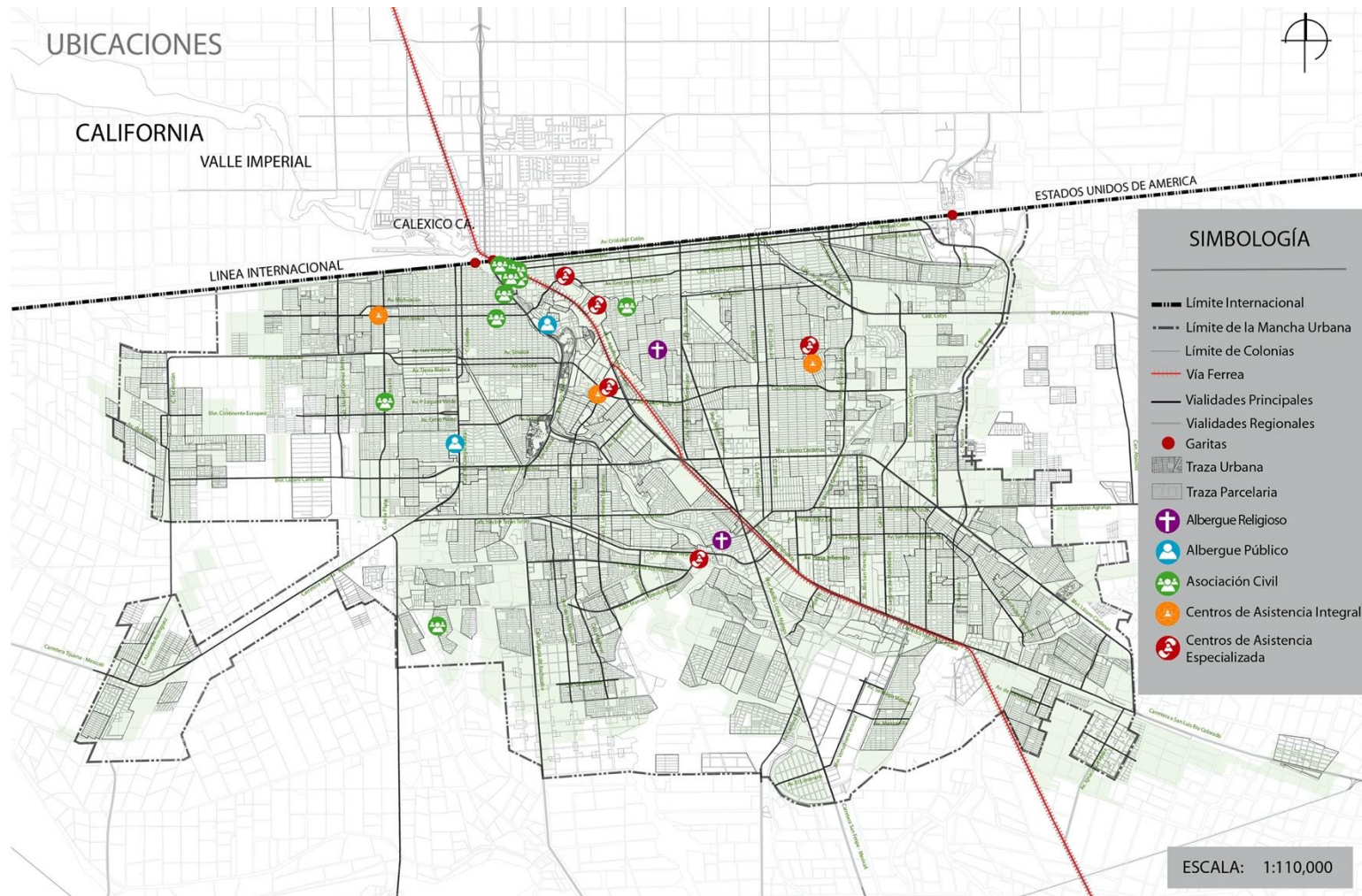


Figura 1. Ubicación de albergues y centros de asistencia en la ciudad de Mexicali. Fuente: autoría propia, 2021

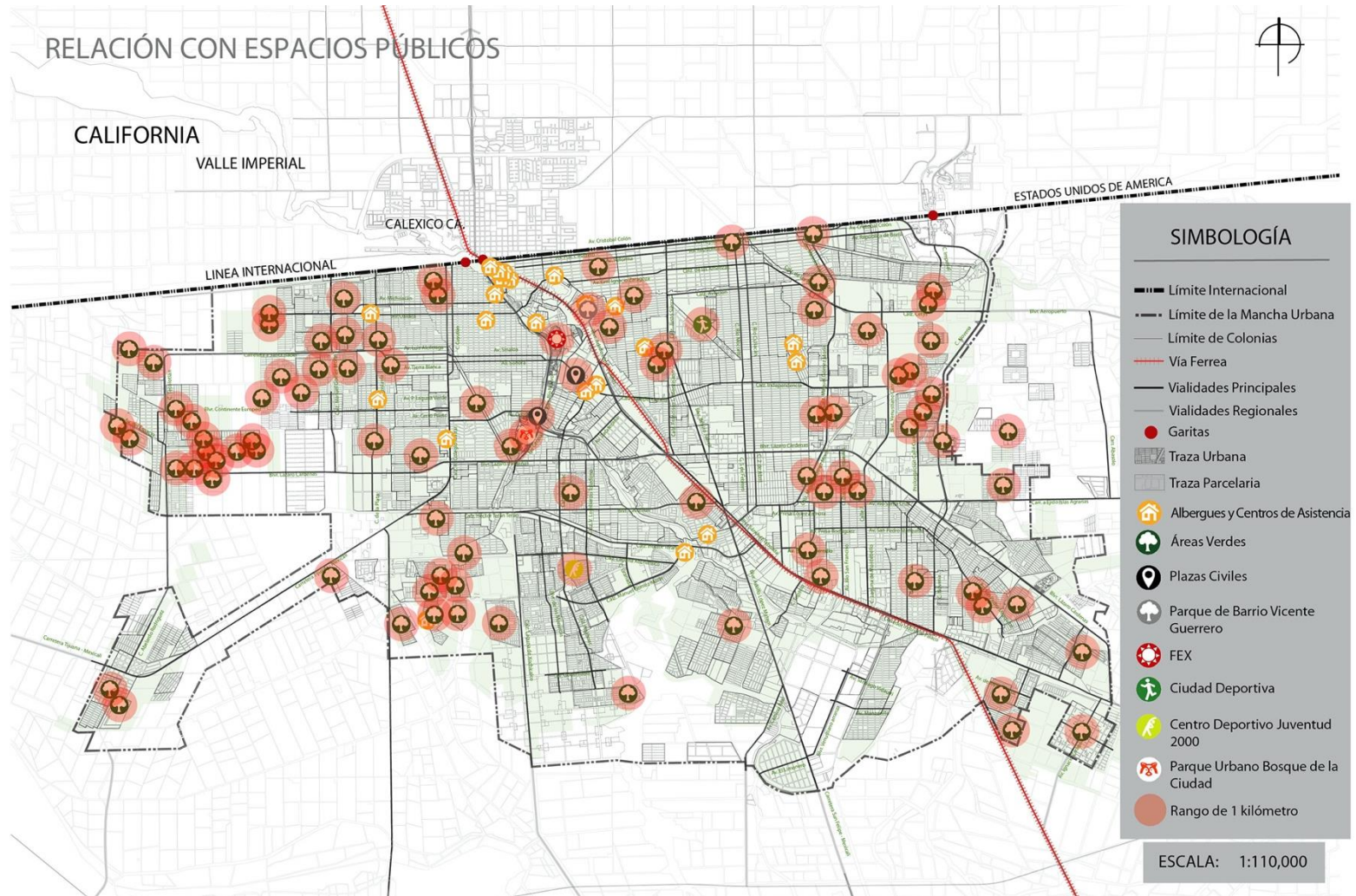
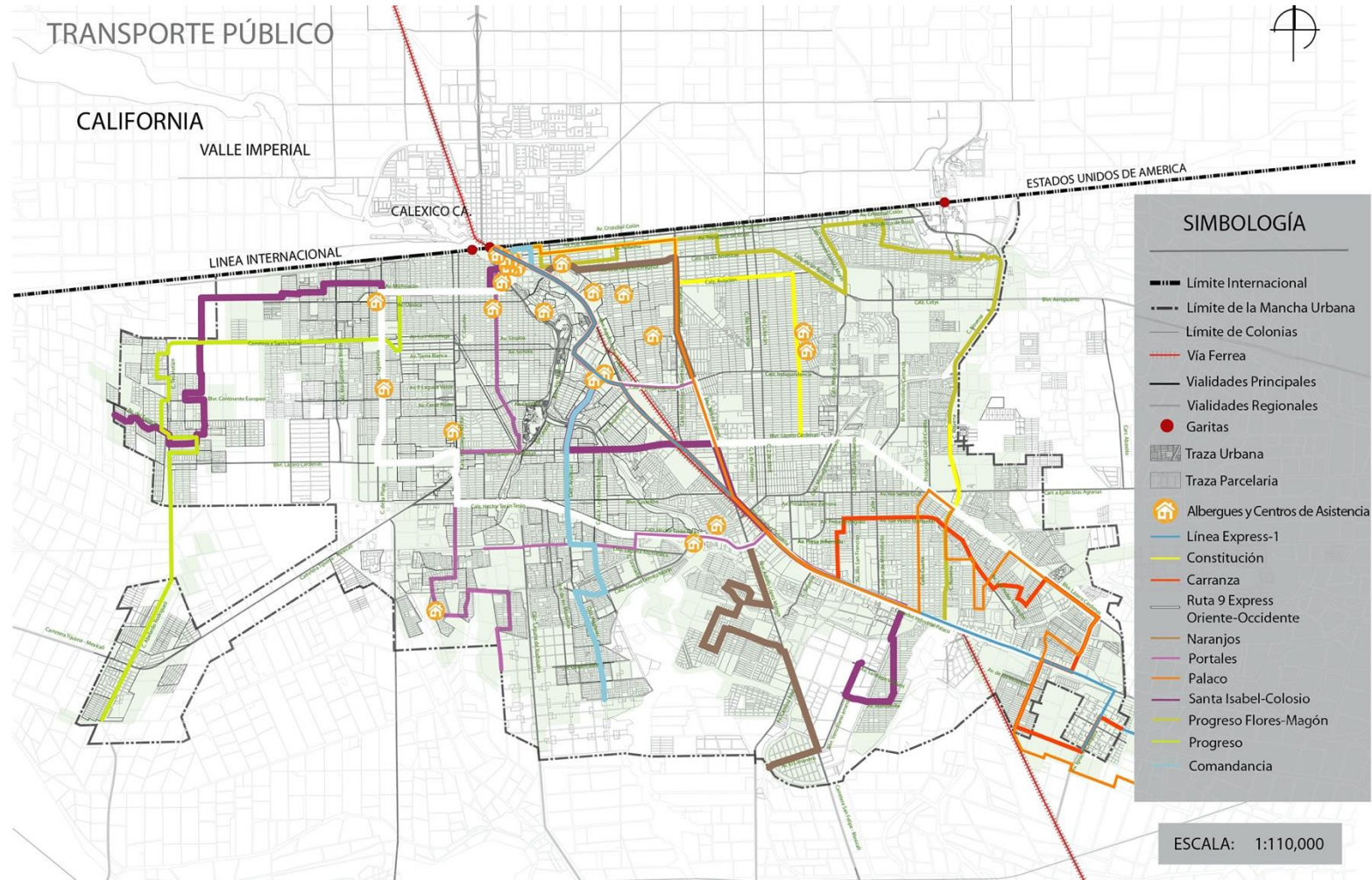


Figura 2. Relación entre el equipamiento dirigido a la población migrante y los espacios de esparcimiento en la ciudad de Mexicali. Fuente: autoría propia, 2021



**Figura 3.** Relación entre el equipamiento dirigido a la población migrante y las rutas de transporte público en la ciudad de Mexicali. Fuente: autoría propia, 2021.



### **3. Resultados parciales: condiciones en que se da la crisis migratoria en Mexicali**

Dada la naturaleza múltiple de los datos y el marco de interpretación, se presentarán los resultados parciales de acuerdo con las cuatro categorías de análisis y sus respectivos códigos. A partir de este punto, se procurará conocer los puntos de convergencia entre temáticas, por ejemplo, de qué manera los aspectos socioculturales se relacionan con la expresión multicultural y, a su vez, cómo éstos inciden en el equipamiento y la estructura urbana. Posteriormente, dichos nodos de encuentro se desarrollarán en la sección de discusión de este mismo apartado.

#### **1. Aspectos sociopolíticos**

Si bien en 2016 se manifestó en Baja California una importante llegada de población haitiana y afrodescendientes, a la fecha esta comunidad se ha integrado exitosamente a las actividades socioculturales más básicas, incluyendo incorporación laboral, registro a planteles de educación superior, matrimonios inter-étnicos y nacimientos. En cambio, los arribos que no han cesado proceden de los países conocidos como el Triángulo del Norte, como lo confirman los propios directores de los albergues.

Es imperante recordar que las movilizaciones provenientes de Honduras, Guatemala y El Salvador surgen a partir de la violencia, la colusión del crimen organizado con las autoridades locales y la carencia de servicios básicos de salud y educación, entre otros factores que empuja a esta población a buscar refugio fuera de su lugar de origen, siendo lo más frecuente la

solicitud de asilo en EUA que, a su vez, encuentra como antesala a México. Lo imperante del asunto recae en la necesidad de asistencia especializada en los ámbitos legal, médico y psicológico que demanda esta situación y que México se ha comprometido a ofrecer en distintos acuerdos internacionales.

Al mismo tiempo, las medidas de restricción implementadas por la administración 2016-2020 en EUA aún manifiestan sus secuelas; por un lado, por los miles de personas que todavía están retenidas en el territorio mexicano en espera de la resolución de sus casos, derivado del Programa Protocolos de Protección al Migrante –también conocido como “Remain in México” –[18]; y por el otro lado, el que las deportaciones no se han interrumpido, a pesar de la postura en campaña del ahora presidente Joe Biden [19]. En este sentido, aunque la actual administración norteamericana dice preparar una nueva reforma migratoria, la aprobación, implementación y beneficios de esta se encuentran todavía lejanos [20].

#### **2. Estructura urbana**

Identificar si la población migrante se orienta en la ciudad resultó más que interesante, ya que evidenció una serie de problemáticas de movilización urbana que inciden de manera directa en su desenvolvimiento e integración socioespacial.

En su experiencia, los directores de los albergues coinciden en que las personas en tránsito no reconocen el contexto urbano de Mexicali y que en la mayoría de los casos son ellos mismos –o el personal a su cargo– quienes deben guiar y definir los hitos que auxilien la ubicación de un centro de



asistencia u otro. Si bien el que un foráneo no reconozca el lugar al que llega es algo normal, el informante de Haias México nos recuerda que las personas que solicitan asilo han tenido experiencias de violencia y discriminación recientes que provocan miedo e inseguridad en espacios desconocidos [21]. De esta manera, mientras las calles y avenidas de Mexicali no cuenten con la señalética adecuada ni garantizan la seguridad de los usuarios en espacios públicos, se atenta con el desarrollo de la población migrante.

Hasta el momento ha sido solamente de manera empírica como las personas en tránsito localizan los servicios a su disposición. Particularmente, la Diócesis de Mexicali cuenta con un módulo de atención en la Garita Internacional con EUA que brinda información sobre los albergues que apoyan. En el caso de aquellos albergues independientes, es la “voz de la experiencia” de quienes han sido deportados en más de una ocasión la que aporta su localización. Mientras que, la proximidad ha resultado de suma relevancia para aquellos albergues ubicados en la zona centro de la ciudad.

Relativo a lo anterior, los medios a través de los cuales la población en tránsito se desplaza por la ciudad son, por decir lo menos, limitados. Por un lado, ya que sus ingresos económicos son inconstantes, el uso de transporte público como camiones, taxis de ruta o taxis de sitio es poco frecuente considerando el elevado costo por viaje. Por otro lado, la escasez de paradas de autobuses, así como la ausencia de rutas en la ciudad, hace prácticamente imposible su uso aun y para quien pudiera pagarlo. Como consecuencia de lo anterior, solo queda llegar a los inmuebles caminando, lo que

podría llegar a ser riesgoso en una ciudad cuyas temperaturas alcanzan 50 grados en verano y cero grados en invierno. También, en ocasiones algunas organizaciones que cuentan con unidades móviles particulares apoyan el traslado de un centro de asistencia a otro, pero esto queda limitado a la capacidad individual de cada asociación.

### 3. Asistencia social

La ayuda que brindan los albergues no se limita a la pernoctación, en la medida de sus posibilidades, estos también ofrecen servicio de comedor, áreas de aseo, dotación de ropa y calzado, servicio de enfermería y canalización a centros de asistencia. Las capacidades suelen ser limitadas, pasando de 100 camas en los albergues públicos a 20 colchonetas en los albergues independientes.

Cada uno de estos albergues cuenta con su propia reglamentación interna sobre horarios, costos y restricciones de estadía; así, se considera notable el que la mayoría de estos estén dedicados a la recepción de hombres mayores de edad, que los menos estén dirigidos a mujeres y niños particularmente, y que aquellas instituciones que aceptan población mixta sean los dirigidos por asociaciones civiles. Por su parte, la asistencia especializada cubre el apoyo legal, psicológico y médico, la gestión de documentos oficiales y el seguimiento en casos relacionados con la violencia y la discriminación. Ahora bien, a decir de los informantes y la propia revisión ciber-hemerográfica, un servicio del cual carece la ciudad y, al mismo tiempo resulta urgente, son los centros de capacitación laboral, cuya finalidad sería la integración de connacionales y extranjeros al sector productivo y a las actividades sociocultural,



en beneficio de ellos mismos, así como de los nativos.

Como nota en paralelo a lo recopilado, vale la pena señalar que, debido a las circunstancias derivadas por la contingencia de salud mundial, tanto centros de asistencia como albergues han tomado medidas especiales, que comprende el limitar sus capacidades al cincuenta por ciento, aumentar el equipo de saneamiento básico y, en medidas extremas, cerrar las instalaciones.

#### **4. Espacio multicultural**

Como ya se ha hecho mención, muchos de los albergues no cuentan con subvención por parte de entidades de gobierno, en todo caso, algunos de los informantes corroboraron que el área de Desarrollo Integral de la Familia (DIF) a nivel municipal llega a cubrir ciertas aportaciones en especie. Esta situación se considera relevante pues, a partir de ello, es posible analizar dos escenarios particulares, referentes a los conceptos de habitabilidad y multiculturalidad.

Primero, los espacios dirigidos por asociaciones independientes se encuentran innegablemente en condiciones lastimosas, con carencias y de peligro para quienes aquí habitan. Esto mismo, ha llevado a sus usuarios a adoptar prácticas socioespaciales que les facilite un ingreso económico o la obtención de productos de apoyo. En contraste, la intervención de la Diócesis de Mexicali en los servicios destinados al migrante ha hecho extensiva la cooperación de la sociedad mexicalense. Aquí son ellos quienes auxilian las necesidades económicas y materiales de los usuarios de los albergues.

Finalmente, los factores ambientales tan particulares del este territorio, que comprenden desde temperaturas extremas hasta vientos de Santa Ana, son elementos a los que no es sencillo adaptarse, por tanto, adverso para la estadía de las personas no nativas o en situación de calle. Es por ello por lo que algunos refugiados solicitan su traslado a otros centros de la frontera norte o sufren golpes de calor, a pesar de las campañas anuales de hidratación en la ciudad.

##### ***a. Discusión: habitabilidad y equipamiento para la frontera norte de México***

Tras el análisis de los resultados, se detectaron una serie de problemáticas de escala urbana, escala barrial, escala arquitectónica e, incluso, escala social, que requieren la intervención de los ámbitos institucional, comercial, público y civil. A continuación, se describirán los de mayor urgencia y factibilidad.

##### ***1. Rango de influencia***

Los albergues y centros de asistencia georreferenciados hasta el momento demuestran una concentración espacial en la zona centro de la ciudad de Mexicali. Sin duda, esto es una característica positiva, ya que es en este lugar donde también se reúnen la mayor cantidad de personas en tránsito o refugiados, ya sea por la proximidad con la Garita Internacional o por una conjetura empírica donde el mayor número de actividades se realizan en los centros de las ciudades. No obstante, la ubicación de estos resulta totalmente arbitraria y, por tanto, desconectada de las dinámicas en la ciudad; es decir, los





albergues y centros de asistencia no presentan relación con las avenidas primarias, las zonas comerciales, los parques industriales, los espacios de esparcimiento ni entre ellos mismos. Los siguientes puntos de análisis abordarán a detalle las consecuencias de estos.

## **2. Integración con los espacios públicos**

El párrafo 53 de la Nueva Agenda Urbana enmarca la relevancia del rol que juegan los espacios de esparcimiento en el desarrollo social, económico y cultural de los asentamientos urbanos al “promover la creación de espacios públicos seguros, integradores, accesibles, verdes y de calidad que fomenten el desarrollo social y económico, con el fin de aprovechar de manera sostenible su potencial para generar mayores valores sociales y económicos” [22]. En el caso puntual de la situación de vida de las personas en tránsito, los espacios seguros, tranquilos y al aire libre podrían favorecer la difuminación del estrés generados por la violencia y la persecución, además de propiciar la resiliencia mental y espiritual.

Sin tomar en cuenta que en Mexicali existe un déficit de espacios públicos y áreas verdes [23], los albergues y centros de atención no se encuentran mínimamente vinculados con los principales parques urbanos y centros deportivos de la ciudad, como lo son el Parque Vicente Guerrero, la Ciudad Deportiva, el Bosque y Zoológico de la Ciudad, el Centro Recreativo Juventud 2000, o el Centro de Desarrollo Humano Integral Centenario; cada uno de ellos ubicado en un sector distinto de la ciudad, más no en las proximidades de los centros de asistencia y los albergues.

## **3. Ausencia de centros de capacitación laboral**

A pesar de haber recopilado información ciber-hemerográfica que destaca una serie de acuerdos entre las autoridades locales y el sector empresarial con respecto a la inclusión de la población migrante en actividades laborales; las intenciones no se acercan a una realidad donde no existen centros de capacitación, espacios educativos especializados o instancias que proporcionen de manera oportuna los documentos necesarios para la incorporación oficial a las escuelas públicas y/o puestos de trabajo existentes en la ciudad. Para el director del Albergue Peregrino, la inclusión a una vida productiva es la prioridad máxima que requiere la población migrante, bajo el supuesto de que ello podría brindarles nuevas oportunidades de vida, además de acabar con los estigmas sociales y el racismo [24].

Ahora bien, dados los tres anteriores puntos sobre la atención prioritaria que requiere el equipamiento dirigido a la población migrante, someramente se contemplan las siguientes propuestas de planeación urbana y sustentabilidad social.

### **a) Conectividad urbana**

Eficientizar las líneas de transporte público garantizarían la conectividad entre el equipamiento dirigido a la población migrante y el resto de la mancha urbana, sin importar la distancia entre un punto y otro. Estos cambios pueden fluctuar desde mejoras básicas, como proporcionar señaléticas multilingües que faciliten la ubicación de los hitos en la ciudad o definir con claridad la ubicación de las paradas de



autobús, así como las distintas rutas del transporte público; hasta una reestructuración profunda, al diversificar las propias rutas o asegurar un precio justo por viaje.

La conectividad urbana también incluye la promoción de calles completas; es decir, aquella que “incluye al peatón y a todos los medios de transporte (ciclistas, motociclistas, autobuses, automovilistas), de todas las edades y con todo tipo de habilidades motoras” [25]. Ya que en múltiples ocasiones son las calles el lugar de reunión y trabajo de los recién llegados, “una calle completa debe permitir la convivencia ordenada de todas las modalidades de movilidad, viendo la calle desde una perspectiva mucho más allá de la vial” [26].

#### **b) Homogeneidad de servicios**

Se recomienda, también, implementar un censo que registre e inspeccione todo equipamiento urbano dirigido a la población migrante, con la finalidad de conocer el vínculo entre ellos, de manera que puedan estar en contacto y apoyarse a través de intermediarios capacitados sobre el tema y que, además, facilite el conocer, evaluar y asegurar la calidad de los servicios que brindan. Esto incluye la disposición de seguridad, salubridad, habitabilidad, flexibilidad de las capacidades, favorecimiento de la multiculturalidad, accesibilidad, cercanía con espacios de esparcimiento, entre otros elementos que se han abordado a lo largo del escrito.

Actualmente, las organizaciones están desvinculadas y, de existir una alianza, ésta se manifiesta de manera directa, sin un orden aparente y sin garantías de que los

acuerdos sean equiparables para ambas partes. Si bien con lo anterior no se pretende invitar a una dependencia gubernamental que lleve al sece de la autonomía, sí que se intenta proponer un control y seguridad de los servicios.

#### **c) Integración a las dinámicas sociales**

Afrontar la crisis migratoria requiere de la aceptación de la problemática y, a partir de ello, celebrar la multiculturalidad que ofrece; es decir, si bien el fenómeno migratorio exige una serie de requerimientos políticos, diplomáticos, económicos y de salud pública a veces imposibles de equilibrar, la realidad contemporánea está lejos de detener las movilizaciones masivas, por el contrario, éstas se visualizan cada vez más diversas y complejas. Aun con ello, estos intercambios de recursos humanos también significan una ampliación y diversificación de la mano de obra, las tradiciones, las prácticas espaciales, los productos de uso diario, el lenguaje, la comida y más. Por ello, las alternativas que aquí se plantean parten de la perspectiva dual de auxiliar a las personas en tránsito, al mismo tiempo que contemplar los beneficios que de ello obtendría la población nativa.

Ya que la ciudad de Mexicali no dejará de ser uno de los puntos de recepción principales a nivel nacional, es urgente el comenzar a integrar esta realidad en cualquier plan o proyecto urbano y social. Hasta ahora se ha mencionado lo apremiante de la inclusión de la población migrante en programas de educación, trabajo, salud, vivienda, transporte, asistencia legal y psicológica, pero las necesidades no se limitan a estos. Es así como lo hasta aquí recabado solo



conforma una fase de algo que se antoja mucho más ambicioso, fructífero y viable.

#### 4. Conclusiones: el trabajo continúa

Dada la complejidad del tema abordado, se opta por redactar las conclusiones a partir de dos puntos: primero, un cierre argumentativo alrededor del fenómeno migratorio contemporáneo y la dotación de equipamiento para la población en tránsito; segundo, determinaciones en relación con el desarrollo metodológico del proyecto de investigación.

*Conclusiones sobre el fenómeno de estudio:* los acontecimientos mundiales contemporáneos sugieren que las movilizaciones migratorias no se encuentran próximas a cesar; por el contrario, es de suponerse que estas aumenten en cantidad y diversidad. Hoy por hoy estos hechos ya han requerido de la implementación de acuerdos internacionales, la intervención de instancias legales y han derivado en cambios urbanísticos sustanciales, tanto en las localidades que se abandonan como en las que reciben a las poblaciones en tránsito. Pudiera afirmarse que la afluencia a lo largo del país mexicano será constante y permanente, ya sea por su situación geográfica o por la postura política de apertura de fronteras que ha caracterizado a este país desde el gobierno de Lázaro Cárdenas del Río y los desplazados por la guerra civil española, hasta la actual crisis pandémica derivada del virus SARS-CoV-2.

Si bien la ciudadanía mexicana demanda servicios básicos prioritarios a atender, la oferta de equipamiento e infraestructura suficiente y eficiente recae en la categoría

de prevención de riesgos. La atención legal, psicológica y médica de migrantes, refugiados y desplazados –sean nacionales o internacionales– previene incidentes de seguridad, salubridad y co-habitabilidad; mientras que, la dotación de otros servicios referentes a la educación y la capacitación de la mano de obra, además de medios de transporte y espacios de esparcimiento adecuados, podrían ser beneficiosos tanto para los recién llegados como para la población nativa.

*Conclusiones sobre el proyecto de investigación:* hasta el momento, el proyecto ha resultado significativo, interesante y un excelente punto de partida para trabajos posteriores. Pero la labor no ha concluido puesto que es del interés del proyecto de investigación general conocer las incidencias recíprocas que tiene el fenómeno migratorio con el desarrollo urbano del sector fundacional de la ciudad de Mexicali, abarcando desde el centro histórico hasta el área habitacional colindante.

En cuestiones metodológicas sobresale la continuidad de las entrevistas semiestructuradas y la observación directa, esta vez dirigidas a la población en tránsito, cuyo universo incluye a personas deportadas, refugiados y solicitantes de asilo, ya sean connacionales, extranjeros o apátridas. También, como un agregado metodológico, se contempla el uso de técnicas de investigación consideradas de corte cuantitativo que contribuirán a triangular las evidencias empíricas como, la utilización de datos estadísticos georreferenciados a través de sistemas de información geográfica (SIG), los Censos Económicos y los de Población de Vivienda, entre otras bases de datos y



registros oficiales. Para el procesamiento de los datos en conjuntos se tiene planea utilizar softwares como ATLAS.ti, ArcGIS, Drone2MAP y otros.

Se espera que todo lo anterior derive en aportaciones metodológicas y de contenido que propicien el avance de otros proyectos ya sea en el entorno estudiado o a lo largo de la franja fronteriza. Se plantea que quien se beneficie sea el sector público como principal usuario de la información, en especial a los ámbitos correspondientes al desarrollo social y urbano de la comunidad; además de que los aportes del proyecto podrían tener un impacto positivo en la formación de recursos humanos, en la divulgación de la ciencia aplicada y en la vinculación del sector educativo con instancias que harían efectiva la aplicación de cualquier solución obtenida.

## 5. Reconocimiento de autoría

*Berenice Vizcarra:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Curación de Datos; Escritura - Borrador original; Escritura: revisión y edición; Administración de proyecto.

## Referencias

[1] Maydeu-Olivare, S., "La violencia, el talón de Aquiles de Centroamérica", Notes Internacionales CIDOB, CIDOB, no. 142, 2016. Recuperado de: [https://www.cidob.org/es/publicaciones/serie\\_de\\_publicacion/notes\\_internacionales\\_cidob/n\\_142\\_la\\_violencia\\_el\\_talon\\_de\\_aquiles\\_de\\_centroamerica/la\\_violencia\\_el\\_talon\\_de\\_aquiles\\_de\\_centroamerica](https://www.cidob.org/es/publicaciones/serie_de_publicacion/notes_internacionales_cidob/n_142_la_violencia_el_talon_de_aquiles_de_centroamerica/la_violencia_el_talon_de_aquiles_de_centroamerica)

[2] INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática, "Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica ENADID 2018", INEGI, México, 2018.

[3] INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática, "XIV Censo general de población y vivienda 2020". INEGI, México, 2020.

[4] Noriega, J.C., "Inicia programa de rehabilitación de la plaza del Mariachi", Periodismo Negro, 17 enero 2020. Recuperado de: <https://www.periodismonegro.mx/2020/01/17/inicia-programa-rehabilitacion-la-plaza-del-mariachi/>

[5] ONU, Organización de las Naciones Unidas, "Nueva agenda urbana (en español)", Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III), Secretaría de Hábitat III, Quito Ecuador, 2017.

[6] ONU, Organización de las Naciones Unidas, "Nueva agenda urbana (en español)", Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III), Secretaría de Hábitat III, Quito Ecuador, 2017.

[7] Taylor, S. J., y Bogdan, R, "Introducción a los métodos cualitativos de investigación", Paidós, España, 1987.

[8] IMIP, Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali, "Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali 2025", XVIII Ayuntamiento de Mexicali, México, 2007.

[9] CEAV, Comisión Ejecutiva de Atención a Víctimas, "¿Qué es la asistencia integral y la ayuda inmediata?" Gobierno de México, 12 diciembre 2017. Recuperado de: <https://www.gob.mx/ceav/articulos/que-es-la-asistencia-integral-y-la-ayuda-inmediata>



[10] Vasilachis, I., "Estrategias de investigación cualitativa", Gedisa, España, 2006.

[11] Vasilachis, I., "Estrategias de investigación cualitativa", Gedisa, España, 2006.

[12] Taylor, S. J., y Bogdan, R., "Introducción a los métodos cualitativos de investigación", Paidós, España, 1987.

[13] Luengo, E., "Una propuesta conceptual", en Luengo, E., Interdisciplina y transdisciplina: aportes desde la investigación y la intervención social universitaria, ITESO, México, pp. 9-25, 2012.

[14] Lamy, B., "Sociología urbana o sociología de lo urbano", Estudios demográficos y urbanos, COLMEX, vol. 21 no. 1, pp. 211-225, 2006.  
<https://doi.org/10.24201/edu.v21i1.1267>

[15] Gutiérrez, J.J. "La obsolescencia del modelo de atención territorial: contribuciones desde la teoría de planeación", en Sánchez, M.T., et al, La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica, UNAM, México, pp. 501-519, 2013.

[16] Lozano, A., "Hacia un transporte urbano realmente sostenible", en Castro, L., La planeación sostenible de ciudades, Fondo de Cultura Económica, México, pp. 65-78, 2018.

[17] Dave, S., "Neighbourhood density and social sustainability in cities of developing countries", Sustainable Development, Wiley Online Library, vol. 19, no. 3, pp. 189-205, 2011.  
<https://doi.org/10.1002/sd.433>

[18] Redacción EC, "'Quédate en México', el polémico programa antiinmigrantes de Trump que comenzará a ser desmantelado por Biden", El Comercio, Perú, 12 febrero 2021. Recuperado de:  
<https://elcomercio.pe/mundo/eeuu/estados-unidos-mexico-donald-trump-joe-biden->

[migracion-frontera-queda-en-mexico-el-polemico-programa-antimigratorio-de-trump-que-comenzara-a-ser-desmantelado-por-biden-nczg-noticia/](https://elcomercio.pe/mundo/eeuu/estados-unidos-mexico-donald-trump-joe-biden-)

[19] Vilchis, R., "Gobierno de Biden deporta a cientos de inmigrantes en sus primeros días", Noticieros Televisa, México, 1 febrero 2021. Recuperado de:  
<https://www.televisa.com/noticias/gobierno-biden-deporta-cientos-inmigrantes-primeros-dias/?fbclid=IwAR0bt4ypoDAJuqLmoxZ2RkVwdU7rrC33dQH%E2%80%A6>

[20] Sancho, V., "Inicia la batalla por el plan migratorio de Joe Biden", El Universal, México, 19 febrero 2021. Recuperado de:  
<https://www.eluniversal.com.mx/mundo/inicia-la-batalla-por-el-plan-migratorio-de-joe-biden>

[21] Guerrero, I., "Comunicación personal", Berenice Vizcarra, 27 noviembre 2020.

[22] ONU, Organización de las Naciones Unidas, "Nueva agenda urbana (en español)", Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible (Hábitat III), Secretaría de Hábitat III, Quito Ecuador, 2017.

[23] IMIP, Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali, "Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali 2025", XVIII Ayuntamiento de Mexicali, México, 2007.

[24] Gómez, A., "Comunicación personal", Berenice Vizcarra, 19 enero 2021.

[25] IMPLAN, Instituto Municipal de Planeación y Competitividad de Torreón, "Calle completa", 25 mayo 2015. Recuperado de:  
<http://www.trcimplan.gob.mx/proyectos/calle-completa.html>

[26] IMPLAN, Instituto Municipal de Planeación y Competitividad de Torreón, "Calle completa", 25 mayo 2015. Recuperado de:



<http://www.trcimplan.gob.mx/proyectos/calle-completa.html>

[27] Vizcarra, B. & Peimbert Duarte, A.J., "Infraestructura y sustentabilidad social ante la multiculturalidad en la frontera norte de México", Contexto, UANL, vol. XV no. 22, pp. 46-57, 2021.

<https://doi.org/10.29105/contexto15.22-3>

[28] Peimbert Duarte, A.J., "De Monte Albán a chinatown: montajes fallidos, mudanzas inciertas" Academia XXII, UNAM, vol. 10 no. 20, pp. 39-57, 2019.

<https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2019.20.72311>

[29] Rosales Martinez, Y., et. al., "Health Services Provision for Migrants Repatriated through Tijuana, Baja California: Inter-agency Cooperation and Response Capacity", Frontera norte, COLEF, vol. 29 no. 57, pp. 107-130, 2017.

[30] Coulange M., S. & Castillo, M. A., "Integración de los inmigrantes haitianos de la oleada a México del 2016", Frontera norte, COLEF, vol. 32, pp. 1-23, 2020.

<https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.1964>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Layered double hydroxides: application in the inhibition of coliforms

## *Hidróxidos dobles estratificados: aplicación en la inhibición de coliformes*

Roberto Guerra-González <sup>1</sup>, Martha Angélica Lemus-Solorio <sup>2</sup>, José Luis Rivera-Rojas <sup>2</sup>, Alfonso Lemus-Solorio <sup>1</sup>, América Abisay Mondragón-Herrera <sup>1</sup>, Marco Antonio Martínez-Cinco <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciudad Universitaria; Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, Edificio "E", Planta Alta. Laboratorio de Investigación. Morelia, Michoacán; México.

**Corresponding autor:** Alfonso Lemus-Solorio, Facultad de Ingeniería Química; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria; Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, Edificio "E", Planta Alta. Laboratorio de Investigación. Morelia, Michoacán; México. E-mail: [1209689x@umich.mx](mailto:1209689x@umich.mx). ORCID: 0000-0003-2736-5600.

**Recibido:** 24 de Marzo del 2021

**Aceptado:** 24 de Julio del 2021

**Publicado:** 31 de Agosto del 2021

**Abstract.** - *In this work, the preparation of different organic/inorganic hybrid materials and their evaluation as bactericides against Escherichia coli (E. coli) and Salmonella typhi (S. typhi) was studied. The main objective of the present investigation was to synthesize and characterize biocompatible hybrid materials that immobilize molecules with antibacterial activity in inorganic lamellar double hydroxides based inorganic lamellar matrices and to evaluate their antibacterial activity against Escherichia coli (E. coli) and Salmonella typhi (S. typhi). The hybrid materials consist of the association of an inorganic lamellar double hydroxide, or hydrotalcite-type compounds, with organic molecules with antibacterial activity, hosted in solids. Lamellar double hydroxides (LDH) are synthetic structures formed by positively charged metal hydroxide films that are stabilized with interlamellar anions. Different hybrid materials have been studied from hydrotalcite-type compounds, such as MgAl, ZnAl and MgFeAl, containing organic species of sodium cephalixin and nalidixic and pipemidic acids. The intercalation of the different anions was performed by one of the different existing methods: coprecipitation of the hydrotalcite-type compounds in the presence of the molecule of interest, and by the memory effect. The characterization of the materials was carried out by X-ray diffraction, IR and solid nuclear magnetic resonance spectroscopy, specifically analyzing the <sup>27</sup>Al and <sup>13</sup>C nuclei, and thermogravimetric analysis. The evaluation of the antibacterial activity of these materials was evaluated on cultures of Escherichia coli (E. coli) and Salmonella typhi (S. typhi) strains. The antibacterial activity of the tested hybrid systems is not always a direct function of the amount of antibiotic intercalated. It was obtained that the LDH ZnAl-NADmem presents a controlled release, since when the material was exposed three times against Escherichia coli (E. coli) bacteria, it continued eliminating bacteria, presenting a bacteriostatic effect in the third exposure, since it did not eliminate bacteria.*

**Keywords:** inhibition, hybrid materials, antibacterial.

**Resumen.** - *En este trabajo se estudió la preparación de diferentes materiales híbridos orgánicos / inorgánicos y su evaluación como bactericidas frente a Escherichia coli (E. coli) y Salmonella typhi (S. typhi). El objetivo principal de la presente investigación fue sintetizar y caracterizar materiales híbridos biocompatibles que inmovilizan moléculas con actividad antibacteriana en matrices lamelares inorgánicas basadas en dobles hidróxidos lamelares inorgánicos y evaluar su actividad antibacteriana frente a Escherichia coli (E. coli) y Salmonella typhi (S. typhi). Los materiales híbridos consisten en la asociación de un doble hidróxido laminar inorgánico, o compuestos tipo hidrotalcita, con moléculas orgánicas con actividad antibacteriana, alojadas en sólidos. Los hidróxidos dobles lamelares (LDH) son estructuras sintéticas formadas por películas de hidróxido metálico con carga positiva que se estabilizan con aniones interlaminares. Se han estudiado diferentes materiales híbridos a partir de compuestos tipo hidrotalcita, como MgAl, ZnAl y MgFeAl, que contienen especies orgánicas de cefalexina sódica y ácidos nalidíxico y pipemídico. La intercalación de los diferentes aniones se realizó mediante uno de los diferentes métodos existentes: la coprecipitación de los compuestos tipo hidrotalcita en presencia de la molécula de interés y por el efecto memoria. La caracterización de los materiales se realizó mediante difracción de rayos X, espectroscopia de IR y resonancia magnética nuclear sólida, analizando específicamente los núcleos <sup>27</sup>Al y <sup>13</sup>C, y análisis termogravimétrico. La evaluación de la actividad antibacteriana de estos materiales se evaluó en cultivos de cepas de Escherichia coli (E. coli) y Salmonella typhi (S. typhi). La actividad antibacteriana de los sistemas híbridos probados no siempre es una función directa de la cantidad de antibiótico intercalado. Se obtuvo que el LDH ZnAl-NADmem presenta una liberación controlada, ya que cuando el material fue expuesto tres veces contra la bacteria Escherichia coli (E. coli), continuó eliminando bacterias, presentando un efecto bacteriostático en la tercera exposición, ya que no eliminar las bacterias.*

**Palabras clave:** inhibición, materiales híbridos, antibacteriano.



## 1. Introduction

There are many disadvantages associated with the use of certain drugs. Drugs are distributed in the body according to their physical properties, such as solubility, partition coefficient and charge. Consequently, drugs can reach a wide variety of sites where they may be outside their therapeutic range, may be inactive, or their action may be undesirable or harmful, and therefore have negative side effects. There are currently two methods to enhance drug action [1]:

Controlled release, which attempts to eliminate or reduce side effects by producing a therapeutic concentration of the drug that is stable in the organism. It attempts to achieve zero-order release kinetics and there are usually no changes in the concentration of the drug in the body (compared to intermittent concentration changes in conventional dosing), and site-directed release, which tries to ensure that the drug is released at the required site, while keeping the drug inactive elsewhere in the body.

Today there is an incessant demand for advances in the field of controlled release of biologically or chemically active and environmentally sensitive molecules. The incorporation or immobilization of biologically active molecules into lamellar inorganic matrices allows their isolation from the environment while improving their stability and long-term storage. Thus, the stabilization of active molecules in biocompatible inorganic materials constitutes an interesting route for the preparation of hybrid materials that possess both the advantages of the properties of the inorganic host material and those of the organic host, in the same material. Subsequent release of the active species, if desired, is carried out by simple processes of bipolar or anion exchange interactions with ions present in the medium with which the hybrid material is contacted.

Apart from the problem of storage and stability of the active species we can find one more problem linked to the release process of the active species. An inefficient release system can result in high concentrations of the drug where it is not needed causing possible side effects; or in a rapid drop of the drug concentration below the desired levels. These problems can be solved by designing new systems for the administration and controlled release of active ingredients. These systems should provide kinetic profiles in which the concentration of the molecule remains at the appropriate concentration levels and for an adequate period of time [2].

Technologies to minimize the presence of polluting chemical species in effluents or watercourses have been studied and developed for many decades. Among the many existing possibilities, the immobilization of pollutants, i.e., their passage from the liquid phase to a solid phase, is widely used. Transport between these phases can be driven by various physicochemical phenomena. The processes involved can be as varied as adsorption, dissolution-reprecipitation, co-precipitation, occlusion and ion exchange.

The strategies used to date have been based mainly on adsorption or precipitation/arrestation. However, given that the choice of substrates to be used depends not only on the type of pollutant, but also on its chemical, structural and textural characteristics, which offer a universe of possibilities, these systems are still under study. In addition to the various immobilization alternatives, both anions and cations can be fixed by ion exchange reactions with suitable substrates. However, this process has not been massively applied on a real or plant scale due to the high cost of exchange resins of synthetic origin. As a counterpart, the use of inorganic exchangers seems promising. Most of the available information deals with cation exchange in natural clays. To a large





extent, this is due to their implications on the mobility and bioavailability of cations (contaminants, or not) in soils and water reservoir beds} Complementing the behavior of clays, LDH-type structures allow the possibility of exchanging the anions occupying their interlaminar spaces. LDHs are easily synthesized, in a wide range of compositions, and at low cost. If the LDH components are properly chosen, we will have an inorganic anion exchanger [3];

Although the ability of LDHs to exchange anions has been known for decades, few works have focused on their study, and of all of them, only a few discuss the application of these processes in a real problem [4]. It is interesting then, to evaluate the factors that control the immobilization of ecotoxic anions in synthetic Mg-Al LDHs, and to explore the possible application of these solids as retention agents in effluent treatments or remediation processes. The use of layered double hydroxides (LDHs) as anion immobilization agents also requires knowledge of their stability under the operating conditions in which they are planned to be used. Interestingly, the thermodynamic and kinetic stability of these phases is practically unknown. Although it is known that these phases can be prepared by coprecipitation, which implies that, under certain conditions, they are more insoluble than their component hydroxides, their solubility products are still an unknown.

There is only one paper on this subject [5]. Nothing is known about their dissolution kinetics either. Some authors only mention that they have observed the leaching of the most soluble cation [6]. Others suggest that this process is slower than the dissolution of pure hydroxide [7]. Still others simply ignore this possibility, and subject LDH to conditions where dissolution may be total [8].

In the case of nanopharmaceuticals, the efficacy of active ingredients depends on their intrinsic physical and chemical properties, in addition to their ability to be properly administered into the body. In this sense, we are currently seeking to overcome the limitations of therapeutics and to minimize toxic side effects in order to carry out good drug delivery. Thus, work has been done, for example, on the development of mechanisms to increase the half-life of the drug in plasma, increase the stability of the active ingredient or maximize its therapeutic activity.

The ideal objective of systems for the administration and controlled release of biologically active molecules contemplates two important aspects: spatial localization and temporal or controlled release of the active molecule. Spatial localization is related to the fact that the molecule can reach a specific organ or tissue. Controlled release refers to the control of the rate of release of the active species at the site where it is required. These two aspects cannot always be achieved and, therefore, in many cases, advances in research are still needed to propose new systems for the administration and controlled release of active molecules. For this, both the vehicle and the route of administration, as well as the target (organ or tissue) must always be taken into consideration in order to propose a strategy that allows increasing therapeutic efficiency and, in many cases, decreasing the effects.

In recent research (2012) Martinez D.R. & Carbajal G.G. on the subject of LDHs, were dedicated to review the chemical and structural characteristics of these compounds, the methods of synthesis, their intercalation or functionalization products and reaffirm the various areas in which they can be applied.

In 2019 Aristizabal D. managed to optimize the conditions to synthesize nano LDH with the



appropriate properties to be used as drug nanocarriers and describe the interaction of nanocarriers with biological fluids, starting with

The method of preparation of the LDH ZnAl is described, as well as the preparation of the hybrid materials from the LDH and the organic anion of nalidixic acid. The techniques used for the characterization of the different materials are also described.

### ***2.1 Homogeneous coprecipitation method with urea***

The ZnAl-NO<sub>3</sub> solid was synthesized by the urea hydrolysis method, traditionally, due to the products of urea hydrolysis (A. Inayat et al., 2011), this method leads to the formation of LDH with carbonate anions in the interlamellar region. This result is independent of the type of metal salts used in the syntheses (chlorides or nitrates). Thus, Zn<sup>+2</sup> and Al<sup>+3</sup> cations precipitate in the form of LDH due to the controlled hydrolysis of urea at 90°C from a solution of Zn and Al nitrates.

During the synthesis, the pH of the solution is gradually increased as the hydrolysis of urea proceeds, while achieving homogeneous local concentrations resulting in the formation of solids of higher crystallinity, larger crystal size (on the order of μm) and homogeneous crystal size distribution, compared to solids synthesized by the coprecipitation method under high or low supersaturation conditions. To avoid the intercalation of CO<sub>2</sub>, in the form of CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, from the hydrolysis of urea, an excess of NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> was added to provide NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ions in solution.

For the synthesis of the solid ZnAl-NO<sub>3</sub>, 0.335 mole of Zn (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6·H<sub>2</sub>O and 0.165 mole of Al

the incorporation of a protein, up to more complex fluids, such as fetal bovine serum.

## **2. Methodology**

(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>-9</sup>·H<sub>2</sub>O were dissolved in 500 ml of CO<sub>2</sub><sup>-</sup> free deionized water at room temperature. Subsequently, 1.65 mole urea and 1 mole NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> were added and the resulting solution was placed in a 500 ml three-hole ball flask equipped with a reflux system. The system was purged by bubbling argon gas for 1 h and the temperature was increased to 90°C using a thermostated bath with sand.

After 10 h at this temperature, the white precipitate obtained was centrifuged for 15 min, washed several times with hot CO<sub>2</sub>-free deionized water. Finally, the solid was dried at 120°C for 12 h in an oven. The prepared solid has a Zn<sup>+2</sup> / Al<sup>+3</sup> = 2 ratio.

### ***2.2 Synthesis of Hybrid Materials***

An intercalation reaction in LDH can be carried out by several pathways, or by only one depending on the LDH/anion system studied. In this work, a strategy similar to that reported in the literature was approached in order to perform the intercalation reactions for each LDH/anion system (U. Costantino et al., 2008).

### ***2.3 Collation by Memory Effect***

This is an indirect intercalation method in which the mixed oxide obtained after heat treatment of the corresponding LDH is brought into contact with a solution containing the anion of interest. After a certain time, the LDH will regain its original lamellar structure and the anions contained in the solution will reside in the interlamellar region. This property is very useful when you want to intercalate an anion different



from the original one, especially in the case of large organic anions.

First, 0.5 g of the LDH was subjected to a heat treatment at 500°C (5°/min) for 5 h in a flow of N<sub>2</sub>. The mixed oxide obtained was put in contact with 30 ml of a solution, previously bubbled with argon, containing the anion of interest (4.8 mmol) and adjusted the pH to a value of 9 with NaOH (0.1 M). The obtained suspension was left in agitation for 7 days. After this time, the solid was separated from the solution by centrifugation and washed with CO<sub>2</sub>-free deionized H<sub>2</sub>O to finally dry it at 50 °C for 48 h. In this way the solids ZnAl-PIPmem, MgAl-PIPmem, MgAlFe-PIPmem, ZnAl-NADmem, MgAl-NADmem and MgAlFe-NADmem were obtained.

#### **2.4 Experimental characterization techniques**

The methodology of the techniques was followed as reported by (Alejandra Santana Cruz, 2014).

##### *X-Ray Diffraction*

X-ray diffractograms (XRD) of the powder samples were obtained on a Philips X'PERT PRO diffractometer; the samples were analyzed in the range 3.4-80 (2θ) and with wavelength CuKα1 = 1.5418 Å. Voltage-amperage of 45 kV and 40 mA were used respectively.

##### *Fourier transform infrared spectroscopy.*

Infrared spectroscopy is used for the identification and study of the functional groups of the molecules that make up the material to be analyzed. Measurements are performed with a Perkin-Elmer FTIR Spectrum Two™ spectrometer, with which powdered solids, rigid solids, plastics, elastic materials and liquids can be analyzed. The advantage of this equipment is that it is not necessary to prepare the sample for

measurement; the material to be analyzed is deposited directly on the lens.

The infrared spectra were obtained using a NICOLET MAGNA IR 750 spectrophotometer. The analyzed region was 4000-400 cm<sup>-1</sup>. The methodology used to obtain the spectra was by forming a pellet by mixing the sample with KBr in a sample:KBr ratio of 1:100 by weight in a manual press. The IR spectra were obtained in the Transmittance mode.

##### *Thermogravimetric Analysis (TGA)*

Thermogravimetry is part of a set of thermal analyses that have been developed to identify and measure the physical and chemical changes that materials undergo when exposed to controlled temperature variations (Conesa Ferrer, 2000).

Specifically, thermogravimetric analyses have been used to study the primary reactions in the decomposition of solid and liquid materials. With thermogravimetry, desorption, adsorption and decomposition reactions are analyzed in an inert gas environment or in the presence of oxygen (Fraga Grueiro, 2001).

The thermograms were obtained from the thermogravimetric analysis equipment SDT Q 60. A mass of between 5 and 20 mg of the samples was used and analyzed in a temperature range of 25 to 850 °C at a rate of 10 °C/min, in nitrogen atmosphere.

#### **2.5 Evaluation techniques for the inhibition of the growth of microorganisms.**

##### *Bacterial strains:*

##### *Purity tests*



Gram staining was performed to verify the purity of the *E. coli* strains, observing their morphology under an optical microscope at 100x.

The corresponding smear was made on the strain to be analyzed with crystal violet and an iodine solution, all of them were stained with a purplish color. Subsequently, they were treated with a decolorizing solution (alcohol-ketone), the gram-positive bacteria retained the dye, due to the composition of their wall, while the gram-negative bacteria did not retain it, the dye being eliminated. Next, they were treated with a contrast dye (diluted fuchsin), the gram-negative bacteria were stained, which ensures that they are gram-negative bacteria.

#### *Turbidity standard for inoculum preparation*

To standardize inoculum density, a barium sulfate suspension was used as a turbidity standard (0.5 on the McFarland scale). Turbidity tests were performed on a Varian Cary 4000 UV-Vis spectrophotometer. The absorbance was measured at 625 nm and incubated under the same conditions until growth was achieved in the range between 0.7 and 0.8 optical density. The standards were stored at room temperature away from light.

#### *Preparation of inoculum*

For inoculum preparation, 3 isolated colonies of the same type of morphology of the strains maintained on tryptic-casein soy agar wedges were taken and grown in tubes containing 5 ml of tryptic-casein soy broth at 37 °C until standard

In order to facilitate the identification of lamellar double hydroxides and hybrid materials, the following nomenclature was adopted for LDH: ZnAl-X, where X indicates the resident anion in the interlamellar region. In our specific case, X can be NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> or CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

turbidity was reached. This suspension contained approximately 1x10<sup>8</sup> Colony Forming Unit (CFU)/ml of *E. coli*. The inoculum was reseeded every 12 h for 5 days to confirm the exponential phase of growth. These strains were stored at 4 °C in order to maintain viability.

### ***2.6 Bacterial growth in the presence of hybrid materials.***

Bacterial growth in the presence of the biocidal materials was determined. For this purpose, the bactericidal capacity of the materials was evaluated in relation to time and average CMB. A standardized inoculum was challenged at fixed concentrations of antimicrobial in a broth. A 0.5 ml sample of the liquid systems was inoculated with bacteria (*E. coli*) in 10 ml of tryptic-casein soy broth contained in screw-capped test tubes. An amount of biocidal material (amount determined as average CMB) was added to each tube and incubated at 37°C with agitation at 30 rpm. Samples were taken at different times (0, 5, 15, 30, 60, 90 and 120 min). The sample taken was seeded in Petri dishes with 20 ml of MacConkey agar by the streak-plate technique.

As a control, one plate was inoculated with culture without bactericidal material, at the beginning and at the end. The plates were incubated inverted at 37 °C for 24 h in an aerobic atmosphere and colony counting was performed.

## **3. Results and Discussions**

### ***3.1 Characterization of ZnAl-X materials***

Zn- and Al-based lamellar double hydroxides were synthesized with different anions by different methods to obtain the solids ZnAl-CO<sub>3</sub>, ZnAl-Cl and ZnAl-NO<sub>3</sub>. The X-ray diffractograms of these solids and the interplanar distances  $d_{003}$  are shown in Figure 1. All the



diffractograms show peaks associated to the characteristic planes of hydroxalcite, no other

phases foreign to this mineral are observed; that is to say that pure LDH were obtained.

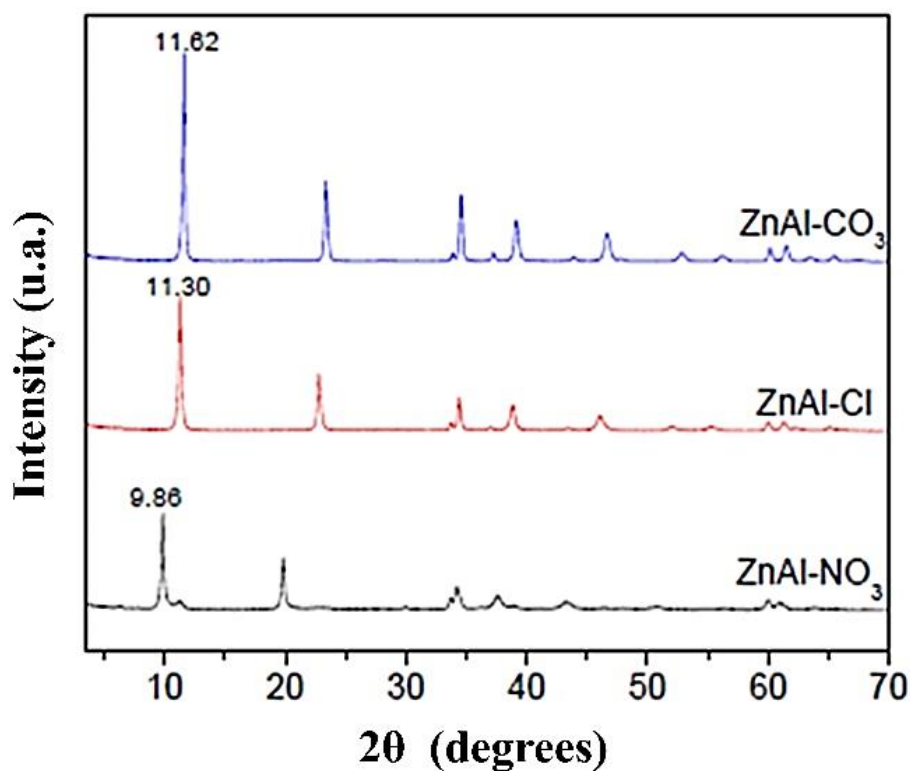


Figure 1. X-ray diffractogram of LDH ZnAl-X.

On the other hand, the infrared spectra shown in Figure 2 (for reasons of clarity the infrared spectrum for the ZnAl-Cl solid is not shown) are congruent with those reported in the literature. On the one hand, both ZnAl-NO<sub>3</sub> and ZnAl-CO<sub>3</sub> solids show a broad and very intense absorption band, centered around 3445 cm<sup>-1</sup>, which is attributed to the vibrational frequency of the νOH

stretching mode of the O-H groups forming the brucite-like films, so it can be stated that up to this point three different types of ZnAl-X solids are available and were used as starting materials for the subsequent preparation of hybrid materials.

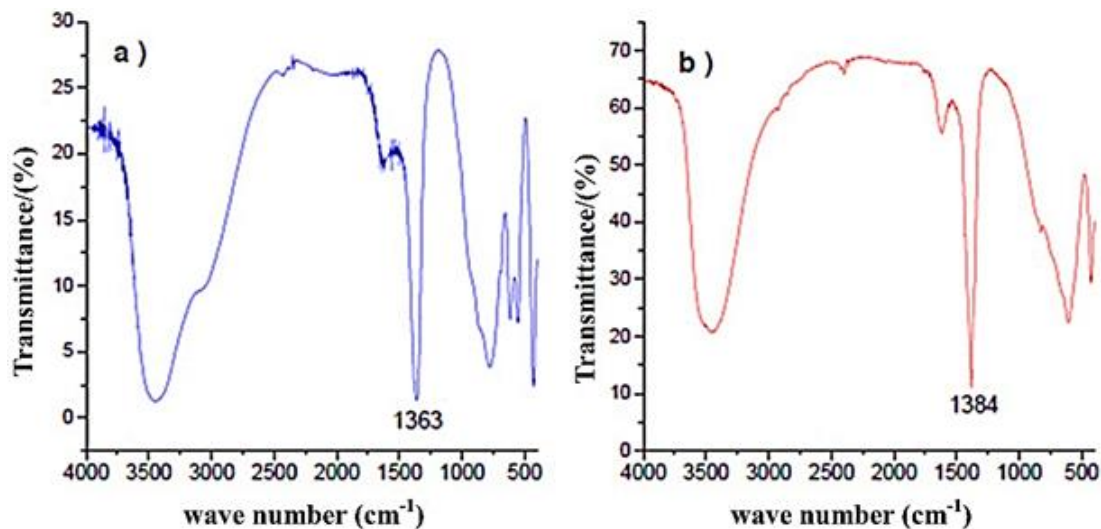


Figure 2. Infrared spectra of fresh LDH ZnAl-X. a) ZnAl-CO<sub>3</sub> and b) ZnAl-NO<sub>3</sub>.

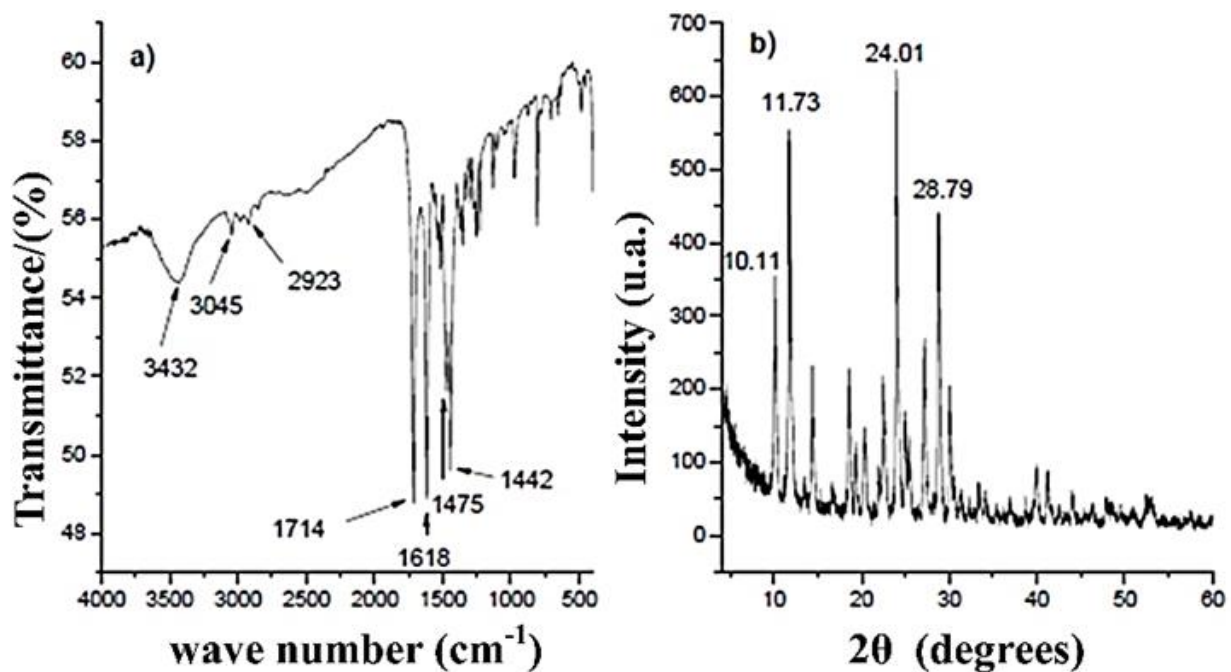


Figure 3. Characterization of the Nalidixic acid molecule. a) FTIR spectrum, b) XRD



### 3.2 Characterization of hybrid materials

In order to better understand the characterization of the hybrid materials, it is convenient here to present both the infrared spectrum and the X-ray diffraction pattern of the molecules that were studied; either of the starting acids or of the sodium salts generated from them. This is with the purpose of keeping them in mind as reference analysis results. Thus, Figure 3 shows the IR spectrum and the XRD pattern of nalidixic acid.

From the general formula of the LDH and the charges of the incoming and outgoing anions, the necessary amount of anions that can enter the interlamellar space is known.

Taking into account the stoichiometry of the exchange; for example, a  $\text{NO}_3^-$  ion would be replaced by a  $\text{Cl}^-$  ion and vice versa; however, a single  $\text{CO}_3^{2-}$  anion would have to be replaced by two  $\text{NO}_3^-$  ions or by two  $\text{Cl}^-$  ions in order not to create a charge imbalance in the interlamellar region. Thus, the charges of both the anion initially present in the interlamellar region and the anion to be introduced must be taken into account to determine the minimum stoichiometric amount of the incoming anion necessary to achieve 100% replacement.

However, the intercalation process does not ensure that the anion will occupy all of that interlamellar space or achieve a 100% replacement rate. Because of the above, when only the minimum stoichiometric amount of incoming anion is placed in contact with an LDH, the exchange is likely to be only partial (Y. T. Kameda et al., 2006).

### 3.3 Nalidixic Acid CMBs and CMI

In order to verify that Nalidixic Acid has a better bactericidal effect against *E. coli* with respect to other drugs, MIC and BMC tests were carried out on the most commonly used drugs for this purpose. Tables 1 and 2 show the MIC and BMC values, respectively, of the drugs as inhibitors of *E. coli*, using the method of dilutions and sowing on agar. Reproducibility was done in triplicate for each bacterial strain. The values reported are the average of the MICs and BMCs for each test, in broth and MH agar, respectively.

**Table 1.** CMI of different antibiotics.

| Drug                      | CMI (mg/mL) |      |      |      |      |      |
|---------------------------|-------------|------|------|------|------|------|
|                           | 0.11        | 0.17 | 0.22 | 0.27 | 0.33 | 0.38 |
| <b>Cloxacillin Sodium</b> | +           | +    | +    | +    | +    | -    |
| <b>Cephalexin Sodium</b>  | +           | +    | +    | +    | -    | -    |
| <b>Sodium Ampicillin</b>  | +           | +    | +    | +    | -    | -    |
| <b>Mg-Al Ampicillin</b>   | +           | +    | +    | +    | -    | -    |
| <b>Nalidixic Acid</b>     | +           | +    | +    | -    | -    | -    |
| <b>Pipemidic Acid</b>     | +           | +    | +    | -    | -    | -    |



Table 2. CMBs of different antibiotics.

| Drug               | CMB (mg/mL) |      |      |      |      |      |
|--------------------|-------------|------|------|------|------|------|
|                    | 0.11        | 0.17 | 0.22 | 0.27 | 0.33 | 0.38 |
| Cloxacillin Sodium | +           | +    | +    | -    | -    | -    |
| Cephalexin Sodium  | +           | +    | +    | +    | -    | -    |
| Sodium Ampicillin  | +           | +    | +    | +    | -    | -    |
| Mg-Al Ampicillin   | +           | +    | +    | +    | -    | -    |
| Nalidixic Acid     | +           | +    | +    | -    | -    | -    |
| Pipemidic Acid     | +           | +    | +    | -    | -    | -    |

Turbidity in the inoculated tubes allowed determining the MIC after 24 hours of exposure of the bacteria to the different materials. The quantification of bacterial colonies that grew on plates with MH agar was performed after 18 and 24 hours of incubation at 37°C.

The exposed samples that did not show turbidity were sown in petri dishes with Müller-Hinton agar, showing that bacterial growth was null. This shows that the materials have a bactericidal effect on *E. coli*. It should be noted that those translucent tubes whose turbidity was very low (less than 50 NTU) or close to zero were considered as systems in which there was no growth. Those tubes with apparent turbidity and values greater than 50 NTU were considered systems with microbial growth.

With this descriptive turbidimetric test method, some answers can be obtained about the behavior of bacteria in the presence of bactericidal agents,

such as suppression in the level of growth in the stationary phase, decrease in the growth rate and lethality (Davidson and Parish, 1989).

Microbiological tests to evaluate inhibition times Before evaluating the bactericidal character of the materials, quality controls were performed on the working strains by microdilutions. The results of the quality controls (viability and purity) of *E. coli*, used in the bactericidal evaluation, met the acceptance criteria by obtaining viability values in the order of  $1 \times 10^8$ , so that the purity results comply with the condition of cultures free of microbial contamination.

Table 3 and Figure 4 report the average values of *E. coli* colonies that survived in each of the three trials, for each of the exposure times to the different drugs evaluated as biocides. The microbial growth and colony count of the *E. coli* strains in the presence of the different bactericidal materials were calculated taking into account the number of initial colonies in the suspension of inoculated microorganisms and the colonies that grew or were eliminated during the exposure time.

The bactericidal effect of the materials was assessed by measuring cell viability at 0, 5, 30, 60, 90 and 120 minutes after exposure and incubation of the bacteria with the different materials. The tests were performed in triplicate on McConkey agar plates. These tests made it possible to define the moment at which the biocidal agent acts on the bacterial replication cycle, in such a way that each drug presents a different graph according to its mechanism of action.





**Table 3.** Colonies of *E. coli* that survived against drugs.

| Amoxicillin Sodium(C <sub>16</sub> H <sub>19</sub> N <sub>3</sub> O <sub>5</sub> S) |     |     |     |         |             | MgAl -ampicillin(C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> N <sub>3</sub> NaO <sub>4</sub> S)   |     |     |         |             |
|---|-----|-----|-----|---------|-------------|---|-----|-----|---------|-------------|
| Time (min)  | E1  | E2  | E   | Average | Uncertainty | E1  | E2  | E3  | Average | Uncertainty |
| 0   | 170 | 170 | 174 | 171     | 1           | 172   | 171 | 170 | 171     | 1           |
| 5   | 153 | 150 | 155 | 152     | 2           | 71  | 70  | 71  | 70      | 0           |
| 15  | 117 | 120 | 118 | 118     | 1           | 40  | 42  | 42  | 41      | 1           |
| 30  | 86  | 88  | 88  | 87      | 1           | 31  | 30  | 33  | 31      | 1           |
| 60  | 68  | 71  | 67  | 68      | 1           | 18  | 19  | 21  | 19      | 1           |
| 90  | 44  | 48  | 45  | 45      | 1           | 11  | 12  | 14  | 12      | 1           |
| 120   | 16  | 15  | 14  | 15      | 1           | 0   | 1   | 2   | 1       | 1           |
| Nalidixic Acid (C <sub>12</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )     |     |     |     |         |             | Pipemidic Acid(C <sub>14</sub> H <sub>17</sub> N <sub>5</sub> O <sub>3</sub> )        |     |     |         |             |
| Time (min)  | E1  | E2  | E3  | Average | Uncertainty | E1  | E2  | E3  | Average | Uncertainty |
| 0   | 171 | 170 | 168 | 169     | 1           | 169   | 170 | 170 | 169     | 0           |
| 5   | 109 | 110 | 111 | 110     | 1           | 82  | 80  | 81  | 81      | 1           |
| 15  | 63  | 62  | 61  | 62      | 1           | 52  | 51  | 51  | 51      | 1           |
| 30  | 11  | 10  | 12  | 11      | 1           | 5   | 6   | 5   | 5       | 1           |
| 60  | 1   | 0   | 0   | 0       | 0           | 0   | 0   | 0   | 0       | 0           |
| 90  | 0   | 0   | 0   | 0       | 0           | 0   | 0   | 0   | 0       | 0           |
| 120   | 0   | 0   | 0   | 0       | 0           | 169   | 170 | 170 | 169     | 0           |
| Cephalexin Sodium(C <sub>16</sub> H <sub>17</sub> N <sub>3</sub> O <sub>4</sub> S)  |     |     |     |         |             | Cloxacillin Sodium(C <sub>19</sub> H <sub>18</sub> N <sub>3</sub> ClO <sub>5</sub> S) |     |     |         |             |
| Time (min)  | E1  | E2  | E3  | Average | Uncertainty | E1  | E2  | E3  | Average | Uncertainty |
| 0   | 172 | 171 | 175 | 172     | 1           | 172   | 170 | 172 | 171     | 1           |
| 5   | 124 | 121 | 131 | 125     | 4           | 121   | 120 | 123 | 121     | 1           |
| 15  | 91  | 83  | 85  | 86      | 3           | 90  | 85  | 87  | 87      | 2           |
| 30  | 54  | 52  | 53  | 53      | 1           | 43  | 42  | 45  | 43      | 1           |
| 60  | 33  | 30  | 31  | 31      | 1           | 27  | 29  | 32  | 29      | 2           |
| 90  | 27  | 26  | 28  | 27      | 1           | 15  | 17  | 18  | 16      | 1           |
| 120   | 8   | 7   | 8   | 7       | 0           | 7   | 8   | 6   | 7       | 1           |



Figure 4 shows the results of the tests performed with different antibiotics as inhibitors of *E. coli*, showing that NAD and Pimemidic acid (PIP) were the ones that eliminated the bacteria in the shortest time; however, NAD is more economical than PIP, so it was decided to perform this work with NAD (Nalidixic acid).

The prolonged release of the biocide from biocidal LDHs must be attributed to dipolar interactions between the organic biocide and LDHs and occurs in other similar organic-LDH hybrid compounds [14,15].

In similar studies by Santana Cruz et al. in 2018 refer (Although *S. typhi* is more resistant than *E. coli* to both nalidixic acid and pipemidic acid incorporated into LDHs, it is clear that LDH-biocide interactions are favorable for killing *S. typhi*) (Santana A.; Flores J.L.; Guerra R.; & Martínez M.J.et al., 2016). In results of Antibacterial activity of pipemidic acid-hybrid ions. MgFeAl-Cl allows the rapid development of colonies of *S. typhi*. In contrast, the MgFeAl-PIP hybrid material showed good activity to kill bacteria, as only 12% of colonies survived after 90 min of exposure. MgFeAl-PIP is less active in killing *S. typhi* than *E. coli* pathogens.

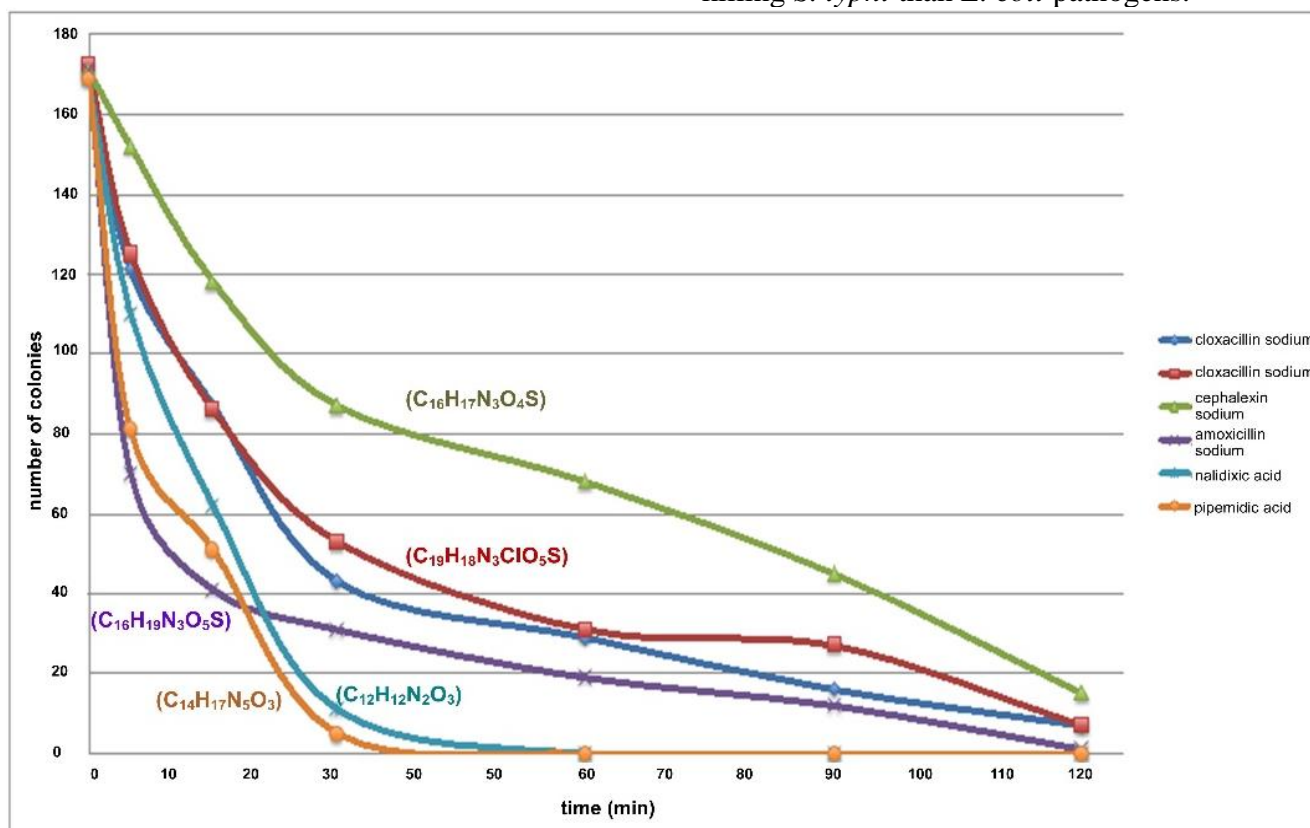


Figure 4. Colonies of *E. coli* that survived against drugs.



#### 4. Conclusions

According to the results obtained, the LDH ZnAl-NADmem presents a controlled release, since when the material was exposed three times to *E. coli* bacteria, it continued to eliminate bacteria, presenting a bacteriostatic effect in the third exposure, since it did not eliminate bacteria. The ZnAl-NADmem material obtained by memory effect, is a laminar and very crystalline material but with a very low degree of intercalation, which to some extent is an advantage because it does not require much antibiotic to present good antibacterial activity, this is due to a synergistic effect between the inorganic matrix and the antibiotic. LDH MgFeAl-NADmem also shows good antibacterial activity, however, its synthesis represents a higher cost with respect to ZnAl-NADmem. In general, on the hybrid systems analyzed, the antibacterial activity is not always a direct function of the amount of antibiotic intercalated. It seems that the activity depends precisely on the inorganic matrix-antibiotic system studied. From the above arises the idea that there is, in some systems, a synergistic effect between the inorganic matrix and the antibiotic that results in an efficient inhibition system.

#### 5. Author acknowledgement

*Roberto Guerra-González*: Research; Methodology; Supervision; Acquisition of funds; Resources; Writing original draft. *Martha Angélica Lemus-Solorio*: Research; Methodology; Formal analysis, Visualization; Writing: revision and editing. *José Luis Rivera-Rojas*: Research; Data Curation; Methodology; Software; Formal Analysis. *Alfonso Lemus-Solorio*: Methodology, Conceptualization, Original draft writing, Project management. *América Abisay Mondragon-Herrera*: Conceptualization; Research, Methodology.

*Marco Antonio Martínez-Cinco*: Visualization; Validation; Formal Analysis; Data Curation.

#### References

- [1] Brown, J.P., McGarraugh, G.V., Parkinson, T.M., Wingard, R.E., Onderdonk, A.B., *J. Med. Chem.*, 26, 1300 (1983). <https://doi.org/10.1021/jm00363a015>
- [2] Saez Virginia, Estibaliz Hernáez, Lucio Sanz Angulo. Sistema de liberación controlada de medicamentos. *Revista iberoamericana*. 2002; 3(3): 1-16
- [3] Stadler M., Schindler P.W., *Clay Clays Miner.*, 1993, 41, 3, 288. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1993.0410303>
- [4] Ookubo A., Ooi K., Hayashi H., *Langmuir*, 1993, 9, 1418. <https://doi.org/10.1021/la00029a042>
- [5] Allada R.K., Navrotsky A., Berbeco H.T., Casey W. H., *Science*, 2002, 296, 721. <https://doi.org/10.1126/science.1069797>
- [6] Tichit D., Bennani M.N., Figueras F., Ruiz J.R., *Langmuir*, 1998, 14, 2086. <https://doi.org/10.1021/la970543v>
- [7] Scheckel K.G., Scheinost A.C., Ford R.G., Sparks D., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, 64, 16, 2727. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00385-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00385-9)
- [8] Legrouri A., Badreddine M., Barroug A., de Roy A., Besse J.P, *J. Mat. Sci. Letters*, 1999, 18, 107. <https://doi.org/10.1023/A:1006647505203>
- [9] Santana A., Flores J., Guerra R., Felipe C., Lima E. (2018). "Organic biocides hosted in layered double hydroxides: enhancing antimicrobial activity"; *Open Chem.*, 2018; 16: 163-169 *Journal xyz* 2017; 1 (2): 122-135. <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0016>
- [10] Lima E., Flores J., Santana Cruz A., Leyva-Gómez G., Kröttsch E., Controlled release of ferulic acid from a hybrid hydroxalcite and its application as an antioxidant for human fibroblasts, *Microporous*



and Mesoporous Materials, 2013, 181, 1-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.07.014>

[11] Koh A., Riccio D.A., Sun B., Carpenter B.W., Nichols S.P., Schoenfisch M.H., Fabrication of nitric oxide-releasing polyurethane glucose sensor membranes, Biosensors and Bioelectronics, 2011, 28, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2011.06.005>

[12] Ben-Knaz R., Avnir D., Bioactive Enzyme-Metal Composites: The Entrapment of Acid Phosphatase Within Gold and Silver, Biomaterials, 2009, 30, 1263 - 1267. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.11.026>

[13] Hooper D.C., Quinolones, in: Churchill Livingstone (Ed.), Princ. Pract. Infect. Dis., New York, 1995

[14] Lima E., Pfeiffer H., Flores J., Some consequences of the fluorination of brucite-like layers in layered double hydroxides: Adsorption, Appl. Clay. Sc. 2014, 88-89, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.011>

[15] Xue T., Gao Y., Zhang Y., Umar A., Yan X., Zhang X., Guo Z., Wang Q., Adsorption of acid red

from dye wastewater by Zn<sub>2</sub> AlNO<sub>3</sub> LDHs and the resource of adsorbent sludge as nanofiller for polypropylene, J. Alloys and Compounds, 2014, 587,99-104.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.158>

[16] Gardner, C.R. en "Drug Delivery Systems: Fundamentals and Techniques", Johnson P. y Lloyd-Jones, J.G. (editores.), VCH Publishers, Nueva York, pag. 12 (1988).

[17] Martínez D.R. & Carbajal G.G. (2012). Lamellar double hydroxides: synthetic clays with applications in nanotechnology. Advances in Chemistry, 7(1), 87-99.

[18] Santana A.; Flores J.L.; Guerra R.; & Martínez M.J. (2016). Antibacterial activity of pipemidic acid-double hydroxide hybrid ions on MgFeAl layers against *E. coli* and *S. typhi*. J. Mex. Chem. Soc vol.60 no.2. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v60i2.74>

[19] Aristizabal, D. (2019). Synthesis and characterization of drug nanocarriers based on lamellar double hydroxides for site-specific delivery in bone tissue. National Council for Scientific and Technical Research.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Edificio escolar público en Bogotá 1916-2019 del modelo Lancasteriano al aprendizaje por proyectos

## *Public school building in Bogotá 1916-2019 from the Lancasterian model to project learning*

Edgard Mauricio Carvajal Ronderos 

Facultad de Arquitectura, Universidad La Gran Colombia, Bogotá D.C, Colombia

**Autor de correspondencia:** Edgard Mauricio Carvajal Ronderos, Facultad de Arquitectura, Universidad La Gran Colombia, Bogotá D.C, Colombia. E-mail: [edgar.carvajal@ugc.edu.co](mailto:edgar.carvajal@ugc.edu.co). ORCID: 0000-0003-3866-9618.

**Recibido:** 17 de Abril del 2021

**Aceptado:** 4 de Agosto del 2021

**Publicado:** 6 de Septiembre del 2021

**Resumen.** - *La investigación recorre la historia de la arquitectura escolar pública en Bogotá relacionándola con el modelo pedagógico utilizado en cada momento, desde el modelo Lancasteriano de mediados del siglo XIX hasta el modelo de aprendizaje por proyectos de la segunda década del siglo XXI, encontramos que el edificio escolar es una herramienta más del proceso de enseñanza – aprendizaje, que satisface las diferentes necesidades que tuviera el profesor para dar su clase. Se estudian las diferentes tipologías arquitectónicas, distribución de los espacios de aprendizaje, normativa y teorías pedagógicas hasta llegar al año 2006 en que se expide el PMEE y se reglamentan en cantidad, condiciones arquitectónicas y ambientales los espacios arquitectónicos de acuerdo con el nivel educativo, el modelo pedagógico se apoyaba en la tecnología. En los años 20 del siglo XXI se empieza el modelo de aprendizaje por proyectos, que es transversal, es decir el trabajo en grupos ya no es solo entre alumnos del mismo curso, incluso del mismo nivel, por lo que las conclusiones de esta investigación propongo las directrices necesarias para diseñar el modelo arquitectónico para los colegios públicos de Bogotá en la década de los 20 del siglo XXI.*

**Palabras clave:** Arquitectura escolar; Modelo pedagógico; Tipología arquitectónica; Ambientes de aprendizaje.

**Abstract.** - *The research covers the history of public-school architecture in Bogotá, relating it to the pedagogical model used at all times, from the Lancasterian model of the mid-19th century to the project-based learning model of the second decade of the 21st century, discovering how the building School is one more tool in the teaching-learning process, responding to the different needs that the teacher had to teach his class. The different architectural typologies, distribution of learning spaces, regulations and pedagogical theories are studied until the year 2006 when the PMEE is issued and the architectural spaces are regulated in quantity, architectural and environmental conditions according to the educational level, the model pedagogical relied on technology. In the 20s of the 21st century, the project-based learning model began, which is transversal, that is, group work is no longer only between students of the same course, even of the same level, so the conclusions of this research we will propose the guidelines necessary to design the architectural model for public schools in Bogotá in the 20s of the XXI century.*

**Keywords:** School architecture; Pedagogical model; Architectural typology; Learning environments.

## 1. Introducción

Lo primero que un arquitecto que se enfrenta al ejercicio de desarrollar un edificio escolar es preguntarse ¿cómo se darán las clases?, ¿cómo aprenderán los alumnos?, entender el modelo pedagógico que se va a emplear permitirá enfrentarse al papel en blanco. La tesis central es que en estos sistemas y métodos se encuentra la principal fuente de inspiración y la determinante central del diseño de los edificios escolares [1].

Siguiendo esta idea hago un estudio por los principales modelos pedagógicos que se implementaron en los colegios públicos de Bogotá, desde el Lancasteriano basado en la disciplina, con una media de entre 300 y 400 alumnos por profesor, económico para las rentas estatales, pero con resultados de baja calidad. Los cambios sociales, más lentos en Bogotá, que a principios del siglo XX no era más que un pequeño poblado de clima frío, de sociedad conservadora en la cual el comportamiento de la gente y lo que se debía saber dependía de la Iglesia Católica, que tuvo ese monopolio hasta el gobierno de Alfonso López Pumarejo (1934 – 1938), la escuela nueva que se basa en que el aprendizaje dependerá más del alumno que del maestro, en la escuela antigua el educador desempeñaba el papel principal y transmitía los conocimientos al alumno no había aprendizaje, solo memorización [2]. Cambio similar al que se ve al dejar la arquitectura republicana que en Bogotá se destacaba por la presencia de una fuerte ornamentación al modelo moderno,

Durante la dictadura se implementó el modelo Montessori, y con él una relación de protección del maestro hacia el alumno; el modelo se basaba en la autonomía del alumno que es sinónimo de actividad y en el sistema, la disciplina se construye sobre la libertad por lo que dicha disciplina debe ser activa [3], por lo que en los colegios aparecieron las zonas de extensión, áreas verdes que permitirían la relación de los

niños con la naturaleza. Con el dinero del programa Alianza para el Progreso se financió la construcción de un bloque escolar cuyo prototipo fue diseñado por el propio alcalde, arquitecto de profesión, y que en la práctica se construyó en los predios donde cupiera y se necesitara sin reconocimiento del lugar.

A finales de la década de los sesenta, en Bogotá el proceso educativo se apoya en los medios de comunicación, circuitos de radio y televisión al interior del colegio, con la posibilidad de transmitir fuera del mismo colegio y de ese modo aumentar la cobertura escolar; es importante que el tutor sea claro en la instrucción, guía y orientación que se le da al estudiante para el uso adecuado de dichas herramientas [4], se acompañaba de una tipología arquitectónica que no tenía ángulos rectos, en los que las divisiones de las aulas eran flexibles y el trabajo en grupo era la forma de aprender, todo era nuevo y el modelo obviamente se llamó experimental, pero ni se compraron los equipos suficientes y donde hubo equipos no se le dio a los profesores el entrenamiento necesario para el manejo de los mismos ni se les preparó en el nuevo modelo pedagógico, lo que hace volver al sistema de prototipos arquitectónicos que se construyen en los diferentes predios, en el modelo pedagógico del desarrollo integral el individuo vuelve a ser importante, el profesor vigila y se da predominio a las áreas recreativas, por lo que este prototipo conocido como modelo Barco, por desarrollarse en la alcaldía de Virgilio Barco era de tres y cuatro pisos con lo que se liberaba la mayor área posible del lote.

En 1970 se construye el primer colegio Instituto de Educación Media Diversificada (INEM) que ofrecía educación técnica y el edificio se componía de varios bloques, unos para la enseñanza de contenidos teóricos y otros para talleres y prácticas, este modelo era política nacional y se quería construir uno en cada capital de departamento, como política distrital se

planteó el Programa Integrado de Desarrollo Urbano Zona Oriental de Bogotá (PIDUZOB) que en el componente educativo planteaba un currículo flexible, en el que están vinculados los individuos y sus comunidades no solo con las escuelas, universidades, empresas, sociedades y culturas, sino también con principios curriculares como la interdisciplinariedad y la formación integral [5], y las clases prácticas, laboratorios y talleres no se encontraban en cada colegio, sino en uno construido para tal fin conocido como el Centro Auxiliar de Servicios Docentes (CASD), con lo que se ahorra en profesores y construcción.

El modelo de pedagogía humanista que en el que resulta esencial la inclusión de elementos relativos a valores y principios universales, por consiguiente, la labor educativa exige un compromiso genuino con la transformación del sistema y la consolidación de una sociedad del conocimiento sustentado en el rescate, promoción y difusión de valores, a través de la suma de los esfuerzos y las capacidades de todos los actores [6] fue el empleado en los colegios del Plan Ciudad Bolívar, a mediados de la década de los 80 se decidió dotar de equipamientos la localidad de Ciudad Bolívar habitada por personas de pocos recursos económicos y los colegios se enfrentaban a una topografía inclinada pero con suelos de alta resistencia, por lo que la tipología de pabellón con crujías sencillas, los predios eran bastante grandes lo que permitía que los edificios fueran de solo uno y dos pisos permitiendo áreas recreativas de gran extensión. En 1987 se decretó la emergencia educativa porque la cantidad de colegios no era suficiente y la mayoría de los existentes se encontraban en malas condiciones y no permitían el uso de todos los espacios, lo que obligó a que la misma Secretaría de Educación diseñara un modelo de fácil construcción, un piso de altura, cubierta a dos aguas y la localización sería de forma paralela a los linderos del predio, en el espacio central se ubicaba una cancha

multifuncional que era el área recreativa, el humanista continua como el modelo pedagógico. El Plan Maestro de Equipamientos Educativos (PMEE) se promulga en 2006 y en él se decreta la normativa que debe cumplir cualquier edificio escolar, público o privado, en lo concerniente a los espacios que debe tener de acuerdo con el servicio educativo que quiera prestar y el modelo educativo se apoya en la tecnología, los procesos educativos de los colegios se vinculan con los entornos sociales y se hace una inversión en infraestructura educativa nunca vista en el país.

El recorrido termina con el plan de desarrollo conocido como Bogotá Mejor Para Todos del alcalde Enrique Peñalosa (2016 – 2019), en el que se desarrolla el modelo educativo del aprendizaje basado en proyectos en el que el trabajo de los estudiantes no solo es en grupo, sino que además puede ser entre alumnos de varios cursos y diferentes grados obliga a una infraestructura que permita esa flexibilidad, un primer paso es la reforma del PMEE, pero se conserva la tipología arquitectónica de principios del siglo XXI, encontrar los lineamientos necesarios para que la arquitectura escolar responda a ese nuevo modelo de enseñanza – aprendizaje es el objetivo de esta investigación.

El desarrollo arquitectónico no es lineal, aspectos representativos de un modelo se recuperan décadas después, por ejemplo, las zonas de extensión del modelo Rojas Pinilla se recuperan en el PMEE, y al igual que los estudiantes ya no deben estar anclados a un curso, los espacios arquitectónicos deben ser flexibles, multifuncionales, se deben abolir la zonificación, la idea de áreas de aulas, de laboratorios, administrativas como entes aparte y sin relación entre sí, ya no tiene lugar, por ejemplo, varias bibliotecas especializadas son más útiles que una biblioteca central, las zonas de circulación deben ser utilizadas también como espacios de aprendizaje y otras premisas de ese tipo son las conclusiones de este trabajo.



Figura 1. Colegio Benjamín Herrera, uno de los colegios del modelo experimental. Fuente propia

## 2. Metodología

El tipo de metodología empleado es el cuantitativo, teniendo en cuenta que se tomaron datos objetivos de una fuente de información primaria, el archivo de planos de la Dirección de Construcción y Conservación de Establecimientos Educativos de la Secretaría de Educación Distrital (DCCE - SED) y se procedió a realizar un análisis de los edificios paradigmáticos de los diferentes modelos o tipologías arquitectónicas, en especial la forma en que se accede, la localización en la manzana, su sistema estructural, la distribución de los espacios, la ubicación de las aulas, laboratorios y espacios singulares como los auditorios, laboratorios, etc. y la forma en que se circulaba, para encontrar reglas comunes a ellos que se convertirán en la base de los lineamientos de diseño para edificios escolares públicos en Bogotá.

### 2.1. Sistema Estructural

Según el inventario de la Dirección de Construcción y Conservación de

Establecimientos Educativos de la Secretaría de Educación Distrital (Bogotá) el sistema de pórticos es el más usado en los colegios públicos, porque es el que permite vencer luces mayores, y es de rápida construcción. El concreto armado es el material más usado por su bajo costo en comparación con la estructura metálica, la diferencia que puede generar de luces, marca fácilmente los espacios de circulación y las permanencias.

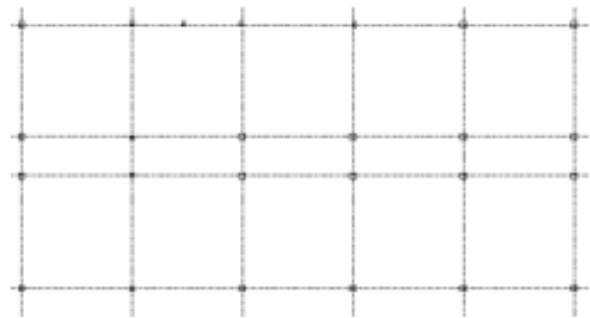


Figura 2. Modelo planta estructural INEM tomado de archivo DCCE - SED

Las cubiertas tuvieron estructura de madera hasta mediados del siglo XX, cuando se fortalecieron las siderúrgicas colombianas y los elementos



estructurales metálicos fueron posibles de emplear, normalmente las cubiertas fueron a dos aguas, con lima hoya como los del modelo Alianza o lima tesa como el empleado para afrontar la emergencia educativa en la década de los 80.



**Figura 3.** Fachada modelo Alianza Tomado de archivo DCCE - SED

## 2.2 Localización en la Manzana

El colegio República de Argentina está localizado en un lote entre medianeras, no mayor a los de las casas del sector, con dimensiones aproximadas de 45 metros de fondo por 25 metros de frente, incluso su fachada es de carácter republicano y no delata su función. Por el contrario, los colegios construidos en el siglo XXI, obligados por los estándares arquitectónicos del PMEE, propendían por ocupar la manzana completa, las cuatro fachadas permitían relacionarse con el entorno, por la vía de menor perfil se plantea el acceso vehicular, se retrocede el paramento del bloque para generar una plazoleta o espacio para el acceso peatonal y el equipamiento se convierte en dinamizador del entorno. A nivel urbano muchos equipamientos educativos se limitan a cumplir su función básica, dándole su espalda al entorno urbano y dejan de lado su carácter convocatorio de encuentro e integración comunitaria, que puede aportar a la construcción y mejoramiento de su entorno [7].



**Figura 4.** Entorno Colegio Tomás Cipriano de Mosquera. Fuente propia

## 2.3 Circulaciones

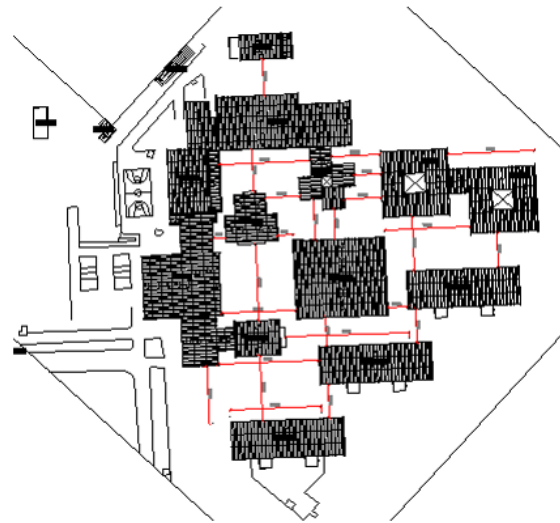
Los diseños de la década de los 30 y los del siglo XXI, generalmente conformaban la manzana, lo que obligaba a generar las áreas recreativas al interior del predio, lo que trae consigo que las fachadas oriente y occidente tengan problemas de climatización por recibir directamente la luz de la tarde, también la topografía es un factor predominante para este factor, en los lotes planos predominaron las circulaciones de doble crujía, mientras que en los de una pendiente pronunciada, como son los colegios de la localidad de Ciudad Bolívar la crujía sencilla en la cual a través del corredor los espacios interiores, en especial los salones tenían iluminación por los dos costados. La característica principal de los colegios posteriores a la promulgación del PMEE es que las circulaciones fueron mucho más anchas que las dimensiones a las que obliga el propio PMEE y las normas de carácter nacional, esto con el objetivo que también fueran espacios de aprendizaje.



**Figura 5.** Circulación colegio Bicentenario Fuente propia.

#### 2.4 Distribución de aulas

De los colegios estudiados únicamente el colegio República de Argentina presenta las aulas concentradas alrededor del punto fijo, con la aparición del movimiento moderno las aulas se agruparon en pabellones, la organización de los pabellones fue variable, en la década de los 30 trataba de conformar la manzana, en los sesenta y setenta los bloques se separaron por sus funciones, por ejemplo el INEM Francisco de Paula Santander tiene varios bloques de aulas que se separaban por los niveles educativos, primaria y secundaria, bloque administrativo, bloques de talleres y aulas especializadas como lo son los laboratorios; la orientación de los bloques fue hacía el norte porque la luz de la tarde no incide directamente en cada espacio y permite la realización de las actividades, las circulaciones entre los bloques eran descubiertas y paralelas a los mismos, los bloques tenían dos accesos, para que su interior hiciera parte también del sistema de circulaciones del colegio.



**Figura 6.** Planta de localización colegio Inem Francisco de Paula Santander. Tomado de archivo DCCE - SED

### 3. El edificio público escolar en Bogotá.

En 1823 Fray Sebastián Mora Berbejo le escribe al entonces vicepresidente Francisco de Paula Santander: (...) Ruego a vuestra excelencia, se sirva señalar un comisionado con las expensas necesarias para que, de acuerdo con el Señor Rector del Colegio de San Bartolomé, se prepare una sala capaz de contener 400 niños en la enseñanza, porque en la que se me ha asignado caben solamente 100 (...) [8] en esta carta el religioso solicita se adapte la infraestructura escolar a las necesidades del sistema pedagógico que se impartía, en este caso el Lancasteriano, sistema muy económico para el Estado, pues un solo maestro podía enseñar a 400 y más alumnos que se ubicaban en una gran aula; alumnos mayores y/o más aventajados a los que se les conocía como monitores trabajaban con grupos de 10 y el maestro, desde una tarima lo supervisaba todo, la instrucción era muy básica, aprender a leer y escribir, sumar y restar y el catecismo, la ventilación y la iluminación era natural, las ventanas se colocaban a la altura necesaria para evitar la distracción de los alumnos, se incentivaba con premios a los alumnos que cumplían y se reprendía con severos

castigos físicos al alumno que cometiera alguna falta.

Mediante la ley 2 de 1870, el gobierno del presidente liberal radical, General Eustorgio Salgar por la cual el gobierno regulaba la educación pública y creaba las escuelas normales para la formación de profesores y el decreto reglamentario del 1 de noviembre del mismo año, que organizaba la educación primaria, reglamentaba el funcionamiento de las normales, los métodos de enseñanza y los requisitos para ser profesor.

En cumplimiento del decreto reglamentario mencionado con anterioridad, se contrata la misión pedagógica alemana que llega el mismo año y dentro de sus recomendaciones está de volver laica la educación y de implantar el modelo Pestalozziano en el cual los grupos son más pequeños no hay castigos físicos y se da importancia a la familia y al niño esto lo practicarían los futuros maestros en las escuelas anexas a las normales donde practicaban lo aprendido. El énfasis en la práctica y no quedarse únicamente en la teoría puede ser el cambio más importante entre este modelo y el Lancasteriano.

El desarrollo educativo en todos los sentidos incluyendo la construcción de edificios escolares fue detenido por el triunfo del bando conservador en la guerra civil ocurrida entre 1899 y 1902, conocida como la guerra de los mil días, casi todas las escuelas fueron usadas como cuarteles, hospitales de guerra, alojamientos militares, etc, además de ser directamente atacadas por el ejército vencedor bajo el precepto que Sin Cristo, las leyes se inspiran en principios materialistas, y por eso a veces amparan al delincuente; el matrimonio es una operación comercial, donde se persigue el mayor tanto por ciento, y la escuela un centro de instrucción para el mal [9].

La ley 39 de 1903, propuesta por el gobierno del presidente Marroquín dividió los niveles

educativos en primaria, secundaria, profesional y artística y propendía porque los edificios escolares fueran propiedad del Estado y generaran las rentas suficientes para garantizar su funcionamiento, del mismo modo ordenaba la inspección de la infraestructura. Las salas de estudio deben ser amplias, con luz natural y ventilación adecuada. (...) los excusados deben ser de agua corriente y debe haber agua suficiente para el aseo de los alumnos [10]. Basados en esa ley la Junta Central de Higiene emite una resolución sobre como debían ser los ambientes escolares: cada alumno debe tener un metro y medio cuadrado, los salones no deben ser mayores a 13 metros de largo por 6 metros y medio de ancho, para poder ver y escuchar al profesor, la ventilación e iluminación de todos los espacios debe ser natural. En 1911 se expidieron los planos tipo de las escuelas de una, dos, tres y cuatro aulas y se dispuso que su localización debería estar alejadas de hospitales, asilos, bares, industrias contaminantes, basureros, etc. Para garantizar la salud de alumnos y profesores.

En Bogotá, a pesar de haber construido varias escuelas con los planos tipo del Ministerio de Educación, en 1916 la Gobernación de Cundinamarca abre el primer concurso público de diseño arquitectónico para un edificio escolar público que se realizara en el país, en las bases se entregaba como programa arquitectónico todos los requerimientos de infraestructura que la normativa exigía, el ganador fue el arquitecto Julio Vergara con un edificio republicano que se encontraba en un predio entre medianeras, pero que se aislaba de los vecinos mediante pasillos laterales que, simulando el gran aula del modelo Lancasteriano, permitiría la práctica del modelo Escuela Nueva que cambiaba el foco del proceso educativo del profesor al alumno, sin que este pierda su autoridad pero ya no la ejerce a partir de un castigo físico o psicológico sino como un orientador en la labor de aprendizaje del alumno. El edificio contaba con una fachada republicana

totalmente simétrica, sobre el eje de simetría se ubicaba el acceso a la edificación, mientras que los pasillos laterales anteriormente descritos entregaban directamente al patio, en el cual se encontraban las baterías sanitarias; la distribución de los espacios al interior del edificio principal era bastante funcional, las plantas se articulaban alrededor de la escalera que se ubicaba como remate al pasillo de acceso sobre el eje de simetría, en el primer piso se ubican tres aulas y las áreas administrativas y en el segundo nivel dos aulas y dos talleres para prácticas.



Figura 7. Plantas colegio República de Argentina. Modificado de archivo DCCE - SED

En la década de los años 30 en el período conocido como la República Liberal, el gobierno motivo la llegada de arquitectos europeos que viajaron al continente americano durante la persecución de los regímenes totalitarios impulsaron el movimiento moderno en la arquitectura colombiana, entre los que se destacan Leopoldo Rother, Karl Brunner, Ernst Blumenthal, Vicente Nasi y Bruno Violi que, junto con varios colombianos, como Carlos Martínez Jiménez, Carlos José Lascano y Julio

Bonilla que estudiaron en Europa y Estados Unidos.

El modelo de la Escuela Nueva se mantiene como el modelo pedagógico a implementar, pero la tipología arquitectónica pasa a ser bastante racionalista, se tiene especial cuidado en la relación con el contexto, ausencia de ornamento, uso de materiales de la región. La escuela Manuela Beltrán ubicada en la localidad de Teusaquillo, obra del arquitecto Carlos Martínez es un muy buen ejemplo de lo que fue el edificio escolar público moderno: ocupa una manzana completa, el edificio se ubicó en el costado oriental, sobre la avenida Caracas, una de las vías de mayor importancia de la ciudad, consiste en tres pabellones de crujía sencilla que rematan en los espacios diferentes a las aulas, un auditorio y un laboratorio, las aulas se ubican en las dos plantas a lo largo del pabellón de mayor longitud que se articula con los otros por medio de dos puntos fijos, la cubierta es a dos aguas, el área administrativa se ubica cerca al acceso.



Figura 8. Colegio Manuela Beltrán. Tomado de archivo DCCE - SED

Durante la dictadura militar del General Rojas Pinilla (1953 – 1957) se realizó la Misión Económica y Humanista que hizo un informe sobre el estado de la educación a nivel nacional, que determinó una reforma educativa que tuvo tres ejes principales: 1. ampliar a todo el país la educación primaria, 2. desarrollar la educación técnica y 3. un sistema de formación industrial. Se optó por el modelo pedagógico Montessoriano que buscaba una educación

basada en los sentidos, con amplia libertad para el estudiante que se relacionaba con su entorno a través de la manipulación de objetos, la autocorrección al momento de ser consciente de cometer un error y la libertad se vuelve el factor que genera la disciplina, no el temor al castigo sino el ejercicio de ser persona, el maestro se convierte en el facilitador del proceso de aprendizaje de esas prácticas, que se implementaba en la educación privada de élite desde 1917 en el Gimnasio Moderno, y 1927 en el Instituto Montessoriano. La tipología arquitectónica conocida como modelo Rojas Pinilla consistía en una serie de bloques de un solo piso de crujía sencilla en la que 5 salones con zonas de extensión y acceso único desde el aula permitían a los alumnos relacionarse con la naturaleza, la cubierta era a dos aguas y sobre el otro costado del pasillo aparecían dos pequeñas baterías sanitarias. En el bloque administrativo aparece la vivienda, espacio destinado para habitación de la persona encargada del mantenimiento de la infraestructura de la edificación, un ejemplo de esta tipología es el Colegio Manuel del Socorro Rodríguez ubicado en la localidad de Rafael Uribe Uribe.

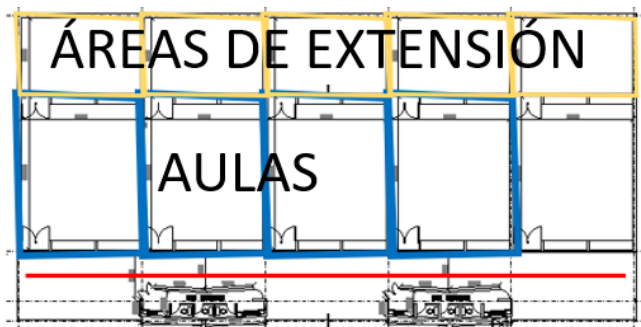


Figura 9. Distribución aulas bloque 1 colegio Manuel del Socorro Rodríguez. Adaptado de archivo DCCEE - SED

Posterior a la dictadura militar, en el gobierno del Frente Nacional y con el dinero que entregó Estados Unidos en el programa Alianza Para el Progreso, el alcalde Jorge Gaitán Cortés, arquitecto de profesión, desarrolló un módulo de fácil construcción que pudiera ser replicado por

toda la ciudad conocido como bloque Alianza, que consistía en un bloque de doble crujía en lima hoyo con aulas a ambos lados del pasillo, área administrativa y baños. En algunos colegios donde se colocaron varios bloques, se eliminaba la separación de dos o más aulas para que sirviera de aula múltiple, o se reemplazaba un aula por laboratorio; contaba con dos accesos, uno en cada extremo del pasillo y la vivienda era un anexo al área administrativa; como las fachadas tenían mayor altura que el pasillo, los espacios eran bastante iluminados. Al igual que el edificio escolar era un sello que se podía replicar, el modelo educativo también se sistematizó, se igualaron currículos rurales y urbanos y producto de la misión alemana se implementaron las guías didácticas, que describían el contenido y la metodología a enseñar por parte del docente, se centraban en el individuo, en el estudiante como ser único al que se le estimula su desarrollo integral, con lo que se garantizaba que la educación pública fuera totalmente igual para todos los habitantes del país, por supuesto Bogotá no fue la excepción.

La Caja de Vivienda Popular evolucionó el bloque Alianza colocándole una segunda planta y para ampliar la espacialidad del corredor la cubierta deja de ser una lima hoyo y pasa a ser a una lima tesa con lo que el corredor del segundo piso era el espacio con mayor altura interior de toda la edificación, la escalera se coloca sobre un acceso y la fachada simula una ventana corrida.

Durante la alcaldía de Virgilio Barco (1966 - 1969) se planteó la necesidad de ampliar la cobertura y se optó por continuar con el sistema de desarrollar una tipología de bloque, esta se conoce como el tipo Barco, que sería construida en los diferentes predios, esta vez se optó por construcciones de mayor altura, tres y cuatro pisos con lo que se buscaba aumentar el área recreativa, el esquema de planta rectangular tenía accesos sobre los cuatro costados y el punto fijo en el centro, las aulas se ubicaran a ambos

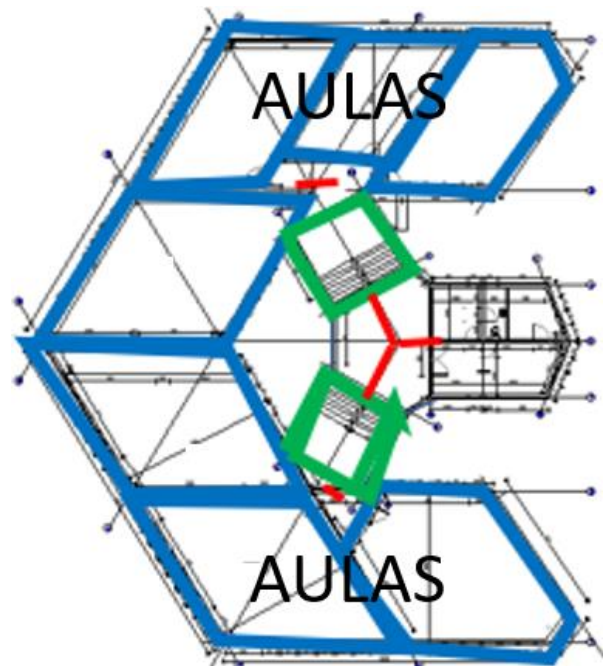
costados del pasillo longitudinal, los laboratorios y el área administrativa se ubicarán en los pisos superiores, se podían colocar varios bloques de estos en un predio, normalmente así se separaban lo que sería educación primaria de la educación secundaria, el modelo pedagógico al igual que en el modelo Alianza y el de la Caja de Vivienda Popular, siguiendo las indicaciones del Ministerio de Educación Nacional.



**Figura 10.** Colegio Marco Fidel Suárez, ejemplo tipo Barco. Fuente propia

La meta que se impuso la Secretaria de Educación Distrital de Bogotá en 1970 era de alcanzar al 100% de la población en escuela primaria, desarrollar la educación preescolar, y mejorar la calidad de la educación, para esto se dio un plazo de 20 años, a principios de la década del 70, surge el Modelo Experimental, tanto en lo que tiene que ver con la tipología arquitectónica como en lo concerniente al modelo pedagógico, que se apoyaba en el uso de los medios de comunicación, desde la escuela se emitían programas educativos por radio y televisión, los profesores con la ayuda del personal técnico de la Alcaldía realizarían los guiones de los programas y se esperaba que la difusión de los mismos ampliaran la cobertura educativa, en especial en primaria, la idea era que se trabajara en grupos de seis alumnos que acompañados más que supervisados por el profesor podrían solucionar los problemas propuestos. La

tipología edilicia también era experimental, el edificio contaba con el punto fijo y las circulaciones en el centro y con la diferencia de medio nivel entregaba a los pisos, a cada lado se encontraban tres aulas con capacidad para 36 alumnos, que a su vez podría convertirse en una para 108, en los descansos de la escalera se ubicaban las baterías sanitarias, las aulas no tenían ángulos a 90 grados, más bien tienen forma de hexágono para que no se desaprovechara ningún espacio al interior. De los 10 colegios construidos solo uno, el colegio Eduardo Santos se equipó con la tecnología necesaria para su funcionamiento, pero no se entrenó correctamente a los profesores ni en el modelo pedagógico ni en el manejo de los equipos, lo que no permitió que el modelo se desarrollara adecuadamente, por lo que fue eliminado en 1975, los edificios funcionaron como colegios típicos a partir de ese momento.



**Figura 11.** Distribución modelo experimental, colegio Benjamín Herrera. Adaptado de archivo DCCE - SED.

Desde 1950 la educación técnica fue un interés del gobierno Nacional pero fue hasta finales de la década de los sesenta que se implementaron los

Institutos Nacionales de Educación Media Diversificada (INEM), que buscaba que los estudiantes al salir de la educación secundaria estuvieran capacitados en la práctica de un oficio lo que les permitiría incursionar en el mercado laboral, para ello se ofrecía formación agropecuaria, artística, comercial, industrial y social, para lo cual el currículo de enseñanza secundaria de seis años se dividió en tres niveles: el básico, el de orientación vocacional y especialización; el edificio respondía a las necesidades académicas, en unos bloques independientes de uno y dos pisos en que se encontraban las aulas en las que se impartirían las clases teóricas, las áreas administrativas y los bloques de talleres y prácticas de acuerdo con la especialidad ofrecida. El diseño de estos colegios atípicos y de los que se esperaba construir uno en cada capital fue realizado por el Instituto Colombiano de Construcciones Escolares, liderado por el arquitecto Rafael Maldonado, el primero, el INEM Francisco de Paula Santander se construyó en Bogotá en 1972.

La política de enseñanza técnica a nivel distrital fue el Programa Integrado de Desarrollo Urbano Zona Oriente de Bogotá (PIDUZOB), financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y buscaba desarrollar la zona oriental de Bogotá en varios aspectos, educación, salud, seguridad, movilidad, etc. En el aspecto educativo se organizaba alrededor del Complejo de Educación Media Diversificada para la Zona Sur Oriental de Bogotá (CEMDIZOB), se ofrecían tres tipos de educación secundaria: en ciencias, en tecnología y en artes, el currículo se dividió por ciclos, el primero se conoció como unidad central que no era diferente al modelo anterior, el nivel medio en el que las clases prácticas no se daban en el colegio al que estaba matriculado el estudiante sino en el Centro Auxiliar de Servicios Docentes (CASD) y el último la unidad escuela, en la cual se desarrollaban las especificidades de la opción elegida por el estudiante. El CASD era un conjunto de bloques con talleres y aulas prácticas

especializadas, laboratorios, bibliotecas, etc. De este modo en los colegios no se construían esos espacios ni contrataban profesores especializados en esas materias. Los bloques correspondían a la tipología pabellón con los puntos fijos en el centro del bloque y las aulas especializadas de mayor tamaño se ubicaban al remate de la circulación en la primera planta, normalmente eran de doble altura.

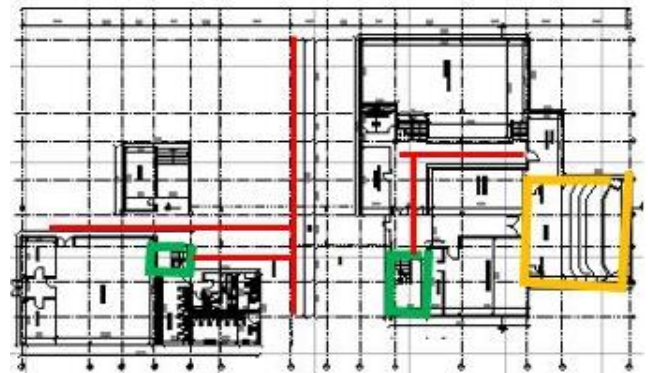


Figura 12. Distribución bloque 2 CASD

En la década de los 80 se creó el plan Ciudad Bolívar, que buscaba dotar de varios equipamientos, en especial educativos, la nueva localidad de la ciudad de Bogotá, en la que vivían principalmente personas de bajos recursos económicos para lo cual se celebró un concurso arquitectónico, cuyo proyecto ganador no se pudo contratar por problemas legales, pero se replicó la tipología del mismo, que consistía en una serie de pabellones de cruz simple, los pasillos no eran muy largos debido a la topografía inclinada del sector, en cada cambio de bloque se ubicaba el punto fijo, los edificios serían de dos pisos, en el primer bloque se encuentra el área administrativa y en el último las aulas especializadas: laboratorios, auditorios. El modelo pedagógico era humanista, que buscaba el desarrollo personal de los alumnos de manera integral, fomentaba la creatividad, el trabajo en grupo, y motivaba al estudiante hacia sus cursos, el autoaprendizaje a través de la solución de problemas asignados por el profesor que tenía el papel de facilitador.

En 1987 el alcalde Julio César Sánchez García declaró la emergencia educativa, esto debido al deterioro que tenían las construcciones educativas, lo que impedía que se pudiesen utilizar todos sus espacios lo que traía como consecuencia la baja cobertura y tener muchos niños por fuera del sistema educativo, por lo que era necesario un sistema de construcciones muy rápida, en la misma Secretaría de Educación se diseñó un modelo de construcciones porticadas de un solo nivel, con cubierta autoportante a dos aguas cuya localización conformaba la manzana y la circulación se cubría con el voladizo de la canaleta y en el área libre se ubicaba una cancha múltiple que hacía las veces de área recreativa, el modelo pedagógico seguía siendo el humanista.

En 2006 se decreta el Plan Maestro de Equipamientos Educativos que decretaba las condiciones espaciales, arquitectónicas, el programa arquitectónico mínimo que debían cumplir los colegios de acuerdo con los niveles



Figura 13. Colegio República de Panamá

Por último, en los colegios diseñados en el plan de desarrollo Bogotá Mejor para Todos, se implementó las modificaciones hechas al PMEE, pudiendo llegar en algunos casos a 6 pisos de altura, se entendía el equipamiento como una pieza más del entramado urbano, las plazoletas de acceso al colegio se debían convertir en sitios de reunión de la comunidad, al interior de este se potencializó el área construida, al usar las

educativos que impartían. Se repusieron muchos colegios que por su época de construcción no cumplían normas de sismo resistencia, y se compraron varios predios de importante extensión para la construcción de lo que se conocería como mega colegios se realizó un concurso arquitectónico y se celebró un contrato con la Universidad Nacional de Colombia, para la elaboración de los diseños, fueron colegios de tres pisos con amplias zonas verdes, en los que se empezó a utilizar la cubierta como zona recreativa y se planteó el aula múltiple como espacio para uso de la comunidad en horarios independientes al escolar y se plantearon nodos escolares, en los que colegios cercanos podían compartir espacios como laboratorios, biblioteca o sala de sistemas. El modelo educativo se apoyaba en la tecnología y se vinculaban con los entornos sociales, por ejemplo el auditorio del colegio se convertiría en el auditorio de la comunidad en horarios diferentes al horario escolar .

cubiertas como zonas habitables, en especial deportivas, las canchas, con las debidas medidas de seguridad se ubicaban en los techos y en el primer piso aumentaban las áreas libres con el mayor flujo de personas.



Figura 14. Colegio Plaza Logística

El modelo pedagógico es el de aprendizaje por proyectos en los que los proyectos interdisciplinarios deben estar sustentados en la coordinación del profesorado y los mismos



deberán cumplir una función dirigida a promover el aprendizaje de y por competencias de los estudiantes, representando a su vez un paso de avance en la obtención de una enseñanza de mejor calidad [11].

#### 4. Resultados y Discusiones

Es claro que los índices exigidos por el PMEE en lo concerniente a ocupación, del predio, área de los espacios de aprendizaje, metros cuadrados por estudiante han mejorado en mucho la calidad de la educación que se presta en Bogotá, las exigencias arquitectónicas que conllevan a generar confort al interior de las aulas y la dotación que se ha llevado a los diferentes colegios han sido varias de las muchas causas que han llevado al mejoramiento de la calificación de los colegios públicos en las pruebas de Estado de secundaria, pero también es cierto que se puede y se debe mejorar todavía más y que la arquitectura escolar debe comportarse como lo que es: una herramienta pedagógica más que se debe usar en el proceso de aprendizaje, como resultado del ejercicio que hicimos vemos que a lo largo de todo el estudio, es decir, desde el colegio República de Argentina de 1916 hasta los proyectos del Plan de Desarrollo Bogotá Mejor Para Todos encontramos la zonificación como la herramienta a la que se acude siempre en los equipamientos de tipo escolar, es decir, aparece el área de aulas, el área administrativa, de servicios, etc.

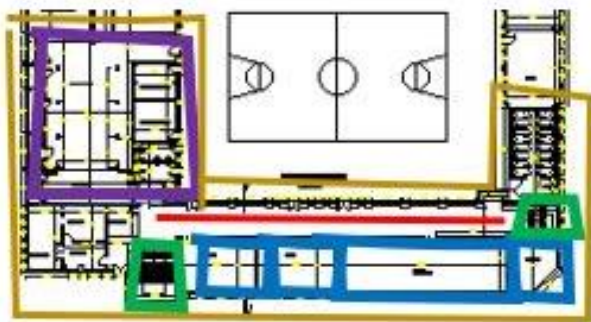


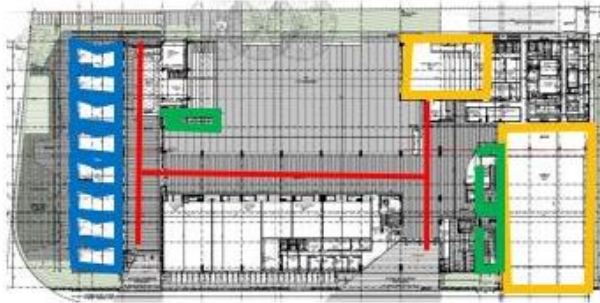
Figura 15. Distribución Colegio Manuela Beltrán

El colegio Manuela Beltrán diseño del arquitecto Carlos Martínez es una muestra de ello, pero al igual que el movimiento moderno trajo consigo una ruptura formal y espacial sobre la forma en que se practicaba la arquitectura, y los edificios escolares tipo sello, como lo fueron los del modelo Alianza, Experimental y Barco, ya no son tenidos en cuenta y lo que se hace es reconocer el lugar y la comunidad en que se implanta el proyecto, también puede ser el momento de causar una ruptura, dejando de usar la distribución por usos, tan preciada en el desarrollo de los edificios escolares de Bogotá.



Figura 16. Distribución colegio Benjamín Herrera, modelo Barco

Y puede haber llegado el momento en que se empiecen a mezclar los usos, que los profesores y las directivas del colegio no se encuentren aislados, por lo general en la planta superior del colegio y se mezclen con el resto de la comunidad educativa, puede que haya llegado el fin de la segregación por usos.



**Figura 16.** Distribución colegio Plaza Logística. Plan de desarrollo Bogotá Mejor para Todos.

En las figuras, 14, 15 y 16 vemos fuertes cambios tipológicos y de emplazamiento entre otros aspectos, nos encontramos que entre los casi 90 años que hay del Manuela Beltrán al Plaza Logística la zonificación heredada de los CIAM se conserva casi que intacta. Por otro lado, también es cierto que los cambios tanto en el modelo pedagógico como en la tipología arquitectónica de los edificios escolares públicos no han tenido toda la efectividad que se buscaba también porque no se han preparado correctamente a los profesores en la práctica de los cambios pedagógicos que se desean emplear, el modelo de aprendizaje por proyectos es una metodología que obliga a cambiar casi que totalmente la metodología con la que dan los cursos, porque deben capacitarse en el uso de herramientas tecnológicas, coordinar con otros docentes de cursos y niveles diferentes para desarrollar el proyecto de la manera que más convenga al proceso de aprendizaje del alumnado

## 5. Conclusiones

Teniendo en cuenta que el modelo de aprendizaje por proyectos es por naturaleza transversal a los niveles y materias se encuentra la necesidad de disponer de espacios fuera de los salones para que los estudiantes puedan realizar sus actividades en grupo, se amplía la circulación, casi que al tamaño de un aula y con un pequeño cambio en el nivel del piso se conforma una

nueva permanencia sin muros, pero con límites claros que servirá de escenario para ese tipo de trabajo, por supuesto de la mano del uso de la tecnología, una fuerte red de soporte de internet y la dotación de aparatos que permitan los primeros pasos de estos niños y jóvenes en la nueva sociedad del conocimiento.



**Figura 18.** Zona de Extensión proyecto colegio San Francisco.

Igual que las aulas trascienden hacia el interior de los edificios con espacios como el que se describe en la figura 17, también pueden abrirse al exterior, hacia la calle y de ese modo también mejorar el contexto urbano, en el siglo XXI se acabaron las concentraciones escolares que más que escuelas parecían cárceles, muros sin permeabilidad, muchas veces rematados en alambres de púas y mallas de seguridad fueron reemplazados por un cerramiento en malla permeable y el muro del colegio, o una zona de aislamiento o separación obligada de la construcción hacia el paramento del lote, ese espacio se puede utilizar con áreas de expansión de las aulas hacia el entorno urbano, de este modo el ambiente de aprendizaje de los alumnos que sería conveniente fuese verde, para lograr una relación directa entre los niños y la naturaleza; el desarrollo de la tipología y los espacios de aprendizaje escolar no ha sido lineal, se van recuperando y adaptando tipologías que han tenido algún valor pedagógico y/o arquitectónico



**Figura 19.** Zonas de Extensión al exterior proyecto colegio San Francisco de Asís.

El ABP desborda la institución educativa, el aula, parte de lo existente rebasando lo irreal y abstracto de los contenidos acumulados del currículo a un contexto cotidiano y una realidad situada, unos contenidos con un fin aplicable que con la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos obtienen un sentido [12], no será fácil para ningún miembro de la comunidad educativa la idea que el aula ya no es lo que nosotros llamábamos el salón de clase, se puede decir sin temor a equivocarnos que con el modelo de aprendizaje por proyectos, cada metro cuadrado construido del edificio escolar, cubierto o no, debe convertirse en un metro cuadrado dedicado al aprendizaje.

El trabajo por grupos heterogéneos, es decir, alumnos de diferentes cursos y niveles, hacen que la consulta de contenidos, la investigación en busca de la respuesta a la pregunta que trae consigo el proyecto se vuelve tan específica que se debe reevaluar la necesidad de una gran biblioteca para todo el colegio, sería mucho mejor varias bibliotecas especializadas por materias y contenidos, el libro en papel no puede desaparecer de los planteles educativos, esto de ningún modo es incompatible con la necesidad de tener una red de voz y datos lo suficientemente fuerte que permita que en cualquier lugar del colegio el alumno pueda conectarse y en espacios como el que vimos en la figura 18 trabajar con su grupo en el proyecto. La división de las aulas debe ser flexibles, que permita el trabajo

completo de dos o tres cursos con sus respectivos profesores.

Esto nos lleva a pensar que el desarrollo de la tipología arquitectónica no es lineal, aspectos que se presentaron en algún momento de la arquitectura escolar en Bogotá se retoma, se mejora y puede ser útil para el modelo de aprendizaje por proyectos, por ejemplo, las zonas de extensión de las aulas de la figura 19 son la reinterpretación de las zonas de extensión de las aulas de los colegios del modelo Rojas Pinilla, y la flexibilización de los salones viene del modelo experimental donde las aulas en forma de hexágono con divisiones móviles permitía actividades de 36, 72 y 108 alumnos según se necesitase, la idea del nodo educativo que estructura el PMEE que consiste en espacios compartidos entre diferentes colegios, la biblioteca, los laboratorios y/o espacios deportivos se prestan de uno a otro es lo que en los setenta hacia el CASD, un colegio exclusivamente con aulas para educación práctica, talleres y laboratorios, con los profesores especializados en dichas materias, permitía economizar recursos en profesores e infraestructura.

Romper con la zonificación de los espacios por usos, que un aula colinde con la biblioteca y esta a su vez con una sala de profesores o un salón de juegos para estudiantes u otro tipo de espacio que permita el acceso a la información y permita la búsqueda a la pregunta que trae consigo el proyecto que desarrollaron los profesores.

## 5. Reconocimiento de autoría

*Edgard Mauricio Carvajal Ronderos:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Curación de Datos: Escritura - Borrador original; Escritura: revisión y edición; Administración de proyecto.

## Referencias

- [1] R. Maldonado, Historia de la arquitectura escolar en Colombia. 1ª. edición. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. 1999, p.12
- [2] G. B. Giovana, Teoría de la educación de la escuela nueva, Universidad Nacional de Educación. 2019, p.7.  
<https://repositorio.une.edu.pe/bitstream/handle/UNE/4380/ESCUELA%20NUEVA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] H. García, Materiales Montessori: una propuesta de intervención educativa en educación infantil, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2017, p. 9.  
[https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/24608/2/garciasantanaharidian2017tfg\\_acceda.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/24608/2/garciasantanaharidian2017tfg_acceda.pdf)
- [4] S. M. Moreno, "La innovación educativa en los tiempos del coronavirus", *Salutem Scientia Spiritus*, vol. 6, num. 1, p. 19, 2020.  
<https://revistas.javerianacali.edu.co/index.php/salutemscientiaspiritus/article/view/2290>
- [5] J.A. Acuña, "El currículo flexible en la educación artística bogotana: ¿una experiencia de equidad o inequidad?", *Papel Político*, vol. 24, num. 1, p. 9, 2019. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.papo24-1.cfea>
- [6] E. Mora y L. P. Villegas, Pertinencia del modelo pedagógico humanista para el desempeño académico estudiantil en pruebas externas, Universidad de la Costa CUC, 2019.  
<https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/2923#:~:text=Entre%20los%20resultados%20obtenidos%20sobre,esperado%20en%20las%20pruebas%20externas.>
- [7] C.A. Benavides, "Ambientes de aprendizaje para el siglo XXI", *Revista Escala*, num. 233, p. 35, 2015
- [8] R. Maldonado, Historia de la arquitectura en Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 1999
- [9] M. Carreño, *Relatos y discursos de la guerra y de la paz en la prensa escrita bogotana durante la guerra de los mil días*, Pontificia Universidad Javeriana, 2015
- [10] O. Zuluaga, *Historia de la educación en Bogotá*, vol. 2, Instituto para la investigación educativa y el desarrollo pedagógico IDEP, 1999
- [11] M. A. Medina y M. P. Tapia, "El aprendizaje basado en proyectos una oportunidad para trabajar interdisciplinariamente", *Olimpia*, vol. 14, no. 46, p. 243, 2017.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6220162>
- [12] P. Romero, *El aprendizaje basado en proyectos*, II Jornada de las guías pedagógicas, Magisterio, 2017. <https://www.magisterio.com.co/articulo/el-aprendizaje-basado-en-proyectos>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Inserción de honeycomb en túnel de viento de la FCITEC

## *Honeycomb insertion in FCITEC wind tunnel*

Oscar Adrián Morales Contreras<sup>1</sup> , Juan Antonio Paz González<sup>1</sup> , Mauricio Leonel Paz González<sup>1</sup> , Emigdia Guadalupe Sumbarda Ramos<sup>1</sup> , José Arciniega Martínez<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México

<sup>2</sup>Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

**Autor de correspondencia:** Dr. Oscar Adrián Morales Contreras, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. E-mail: [moraleso97@uabc.edu.mx](mailto:moraleso97@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0003-0118-8132.

**Recibido:** 15 de Mayo del 2021

**Aceptado:** 12 de Julio del 2021

**Publicado:** 2 de Septiembre del 2021

**Resumen.** - *En este trabajo se presentan los resultados de la modificación en la cámara estabilizadora del túnel de viento de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC), utilizando un honeycomb y cuyo objetivo fue reducir la intensidad de la turbulencia en la zona de pruebas. Se presentan los resultados experimentales y se comparan con un análisis de CFD realizado con el software ANSYS-Fluent. La modificación permitió una reducción de la intensidad de la turbulencia en un 2% en la zona de pruebas.*

**Palabras clave:** Túnel de viento; CFD; Panal; Turbulencia; Perfiles de velocidad.

**Abstract.** - *This research presents the results of the modification in the stabilizing chamber of the Faculty of Engineering Sciences and Technology (FCITEC), wind tunnel using a honeycomb and whose objective was to reduce the intensity of turbulence in the test area. The experimental results are presented and compared with a CFD analysis performed with ANSYS-Fluent software. The modification allowed a reduction in the intensity of turbulence by 2% in the test area.*

**Keywords:** Wind Tunnel; CFD; Honeycomb; Turbulence; Velocity profiles.



## 1. Introducción

En un túnel de viento, la velocidad máxima del flujo se presenta en la zona de menor área transversal, donde se procura localizar la zona de pruebas y si bien se requieren velocidades relativamente altas, también es necesario mantener un flujo estable y uniforme. Tras la experimentación de científicos del siglo pasado se implementaron técnicas para reducir las irregularidades del flujo. Morel [1] menciona que al acelerar el flujo justo antes de la zona de pruebas se logra: reducir las irregularidades del flujo para producir un perfil de velocidades uniforme en la entrada de la sección de pruebas, reducir el nivel de turbulencia relativo y reducir las cargas dinámicas.

Con la contracción del área transversal se obtiene lo último mencionado, del mismo modo, Prandtl [2] recomienda la implementación de un panel de celdas hexagonales (honeycomb) y mallas o pantallas con el propósito de enderezar y uniformizar el flujo antes de la contracción. La sección que los contiene suele llamarse cámara estabilizadora.

Arifuzzman y Mashud diseñaron un túnel de viento subsónico para la Universidad de Ingeniería y Tecnología de Khulna en Bangladesh [3], que tiene una sección transversal de 0.9m por lado y una longitud de 1.35m, por la cual circula aire a 40m/s. El túnel de viento cuenta con cámara estabilizadora que contiene mallas y un honeycomb para reducir las variaciones fluctuantes en la velocidad transversal. El panel tiene poco efecto sobre la velocidad de la corriente debido al hecho de que la caída de presión a través de un panel es pequeña. La razón principal para usar un panel es que, con una longitud suficiente de aproximadamente 10 diámetros de celda, es un dispositivo de enderezamiento de flujo muy efectivo, las especificaciones del honeycomb

utilizado se muestran en la tabla 1, el cual se construyó en el laboratorio de la Universidad con tubos de PVC de clase A en forma de panel.

Tabla 1. Parámetros de Honeycomb [3].

| Parámetros                   | Símbolo   | Valor   |
|------------------------------|-----------|---------|
| <b>Diámetro hidráulico</b>   | Dh        | 2.12 cm |
| <b>Longitud del panel</b>    | Lh        | 12 cm   |
| <b>Numero de celdas</b>      | N         | 38000   |
| <b>Relación de diámetros</b> | Lh/Dh     | 6       |
| <b>Porosidad del panel</b>   | $\beta_h$ | 0.8     |

De las mediciones de presión realizadas se encontró que el honeycomb produce solo el 3% de las pérdidas a diferencia de las mallas que generan el 18%. Los resultados de la caracterización de la zona de pruebas muestran un perfil de velocidad uniforme en la parte central del túnel, tal como se aprecia en la figura 1 y se concluye que el 76% de la sección puede ser utilizada para investigaciones aerodinámicas.

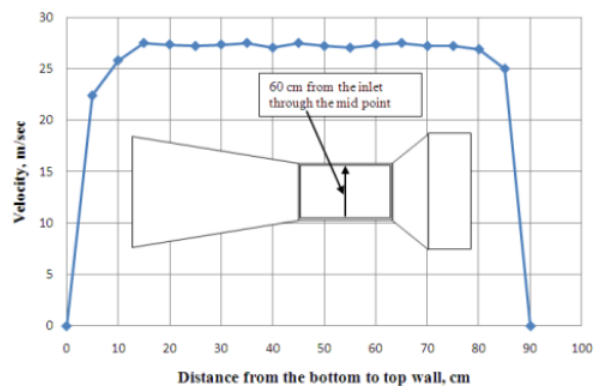


Figura 1. Perfil de velocidad en zona de pruebas [3].



Por otro lado, el túnel de viento diseñado en el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada del Instituto Politécnico Nacional [4] contiene una cámara estabilizadora constituida por un honeycomb y 5 mallas metálicas utilizadas como enderezadores de flujo. El panel se colocó como primer elemento y contiene más de 43000 celdas hexagonales, cada una con 0.0045m de lado, 0.00025m de espesor y 0.011m de largo, lo que permite considerar un diámetro equivalente de 0.00105m. Los perfiles de velocidad obtenidos para la mitad de la zona de pruebas para diferentes valores de velocidad se muestran en la figura 2, puede observarse que el flujo se comporta de manera uniforme y en la figura 3 se presenta una comparación en la intensidad de la turbulencia presente en el túnel de viento, antes y después de implementar el panel y las mallas, y se determinó que la intensidad después de los ajustes es menor al 1%. En la investigación se indica que los datos técnicos de los accesorios del túnel de viento del LABINTHAP se tomaron en base a las recomendaciones propuestas por Loehrke [5], Mehta y Bradshaw [6].

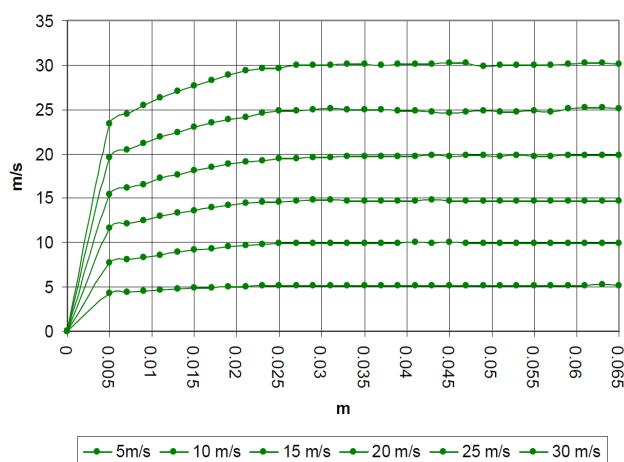


Figura 2. Perfil de velocidad en zona de pruebas [4].

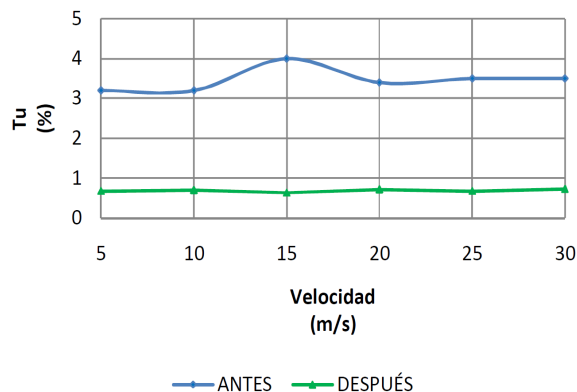


Figura 3. Intensidad de la turbulencia en zona de pruebas [4].

Finalmente, otro trabajo que también trata el uso de panel en un túnel de viento es el desarrollado por Peinado [7], quien realizó un análisis teórico del tipo de honeycomb a implementar, en su estudio plantea la pérdida de presión ocasionada por tres diferentes arreglos que fueron en forma cuadrada, circular y hexagonal. Los resultados muestran que la pérdida de presión es mayor en un 44% cuando se utiliza un panel circular con respecto a uno cuadrado. Finalmente, Peinado menciona que la investigación de Kulkarni et. al [8] sugiere que una relación de diámetros óptima ( $L_h/D_h$ ) para un panel oscila entre 8 y 10, donde  $L_h$  es el grosor del panel en dirección del flujo y  $D_h$  es el diámetro hidráulico de la celda.

## 2. Metodología experimental

El túnel de viento de la FCITEC fue diseñado con una cámara estabilizadora de flujo constituida por malla tipo criba, pero la caracterización de la zona de pruebas realizada por Morales et. al [9], mostro que la intensidad de la turbulencia ( $Tu$ ) era aproximadamente del 5%, por lo que se sugiere sustituir la malla por un honeycomb para reducir la misma.

La selección del nuevo enderezador de flujo se basa en las instrucciones de Barlow et. al. [10], quien sugiere que los coeficientes de pérdida



para geometrías de panel circulares, cuadradas y hexagonales con relación de diámetros ( $L_h/D_h$ ) igual a 6 presenta resultados de 0.3, 0.22 y 0.2, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 4. Los valores obtenidos indican que el panel de celda hexagonal genera pérdidas de presión menores, lo que coincide con lo establecido por Peinado [7]; basados en estos resultados se decide implementar una sección de forma hexagonal.

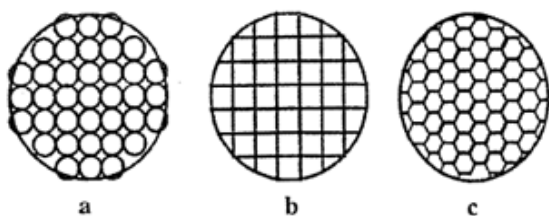


Figura 4. Tipos de honeycomb [8].

Barlow et. al. [10], también indica que otro factor importante a considerar en el diseño del honeycomb es la porosidad ( $\beta_h$ ), la cual se define como la relación entre el área de la sección transversal del flujo real  $A_{flow}$  y el área de la sección transversal total ( $A_{total}$ ) y se debe verificar que se cumpla el criterio siguiente  $\beta_h \geq 0.8$ . Por otro lado, Metha y Bradshaw [6] sugieren que para un beneficio óptimo se debe contar con al menos 25000 celdas en la cámara estabilizadora, esta afirmación la respalda Scheiman de su investigación experimental [11].

### 3. Metodología numérica

Para la simulación del comportamiento tridimensional de los perfiles de velocidad en la zona de pruebas del túnel de viento de la FCITEC, se utilizó el software ANSYS-Fluent [12]. El dominio computacional representa todas las secciones del túnel de viento indicadas en Morales et. al [9], y para su discretización se utilizan 2612813 volúmenes de control tetraédricos, asignando un refinamiento de malla con relación

de aspecto 1.1 como se muestra en la figura siguiente.

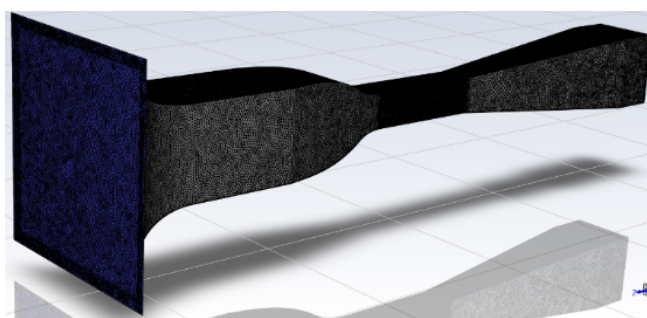


Figura 5. Dominio computacional con malla refinada

El modelo de turbulencia utilizado para la simulación es K- $\epsilon$  estándar, por ser el que mejores resultados presenta para análisis de flujo compresible en secciones cerradas con criterios de convergencia para las variables del modelo de  $1 \times 10^{-5}$  [12], las condiciones de frontera asignadas permiten establecer un flujo uniforme en la sección de entrada y perfil de velocidad completamente desarrollado a la salida, la velocidad inicial asignada para estas condiciones es de 0.734 m/s, lo que permite obtener una velocidad promedio en la zona de pruebas es de 24m/s. Las condiciones de frontera impuestas fueron:

$$\text{Velocity inlet: } (u = \bar{u}; v = 0; w = 0) \quad (1)$$

$$\text{Out flow: } \left[ \frac{d\phi}{dx} \right]_{x_{out}} = 0 \quad (2)$$

donde:  $\phi = u = v = w = P$

### 4. Resultados

La cámara estabilizadora tiene una sección transversal cuadrada de 0.79m, y la especificación técnica del honeycomb instalado en la misma es: HK-5/32-2.5, para su selección se toma en cuenta el catálogo de Gill Corporation [13] y las especificaciones





descritas en la metodología experimental. El panel está fabricado con material de aramida y para unirlo al interior de la cámara estabilizadora se utilizó soldadura escocesa (scotch-weld) con el adhesivo estructural de uretano EC-3532 B/A, para realizar la unión fue necesario limpiar la superficie con disolvente, posteriormente se mezcla isocianato, generalmente conocido como endurecedor o acelerador, con poliol durante 30 segundos aproximadamente, lo que proporciona un tiempo de trabajo entre 5 a 15 minutos, durante el cual se realizó la aplicación del adhesivo en el contorno del panel para posicionarlo al interior del túnel de viento tal como se muestra en la figura 6, una vez instalado se dejó curar durante 24 horas.



Figura 6. Instalación de honeycomb en cámara estabilizadora

En la cámara estabilizadora se colocaron 2 paneles, en las mismas posiciones donde se encontraban colocadas las cribas de entrada y salida del flujo, tal como se indica en la figura 7, la cual se encuentra acotada en milímetros.

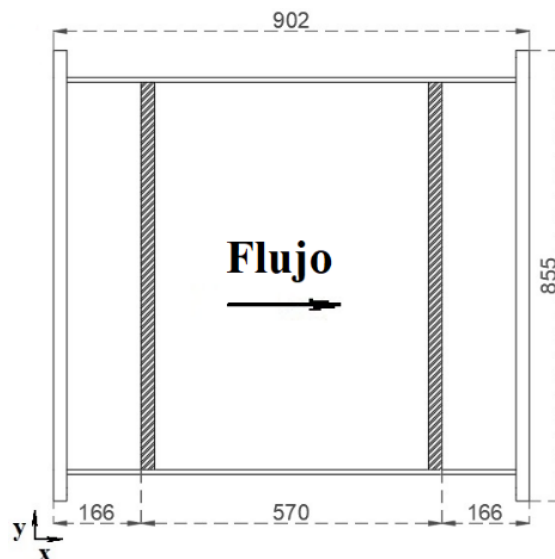


Figura 7. Distribución de paneles en cámara estabilizadora

Con los paneles colocados se midieron 5 perfiles de velocidad en la zona de pruebas para el eje “Y” (A, B, C, D y E) y otros 5 para el eje “Z” (F, G, H, I y J), y para la caracterización de cada perfil se utilizaron 24 puntos de medición distribuidos a 1 cm de distancia entre cada uno. Para la obtención de la velocidad en cada punto se utilizó un tubo de Prandtl y anemómetro digital, y para la determinación de la intensidad de la turbulencia y velocidad promedio, se utilizó la misma metodología descrita en la referencia 9. Los perfiles de velocidad obtenidos numérica (CFD) y experimentalmente se muestran en las figuras 8 a la 13. El número de Reynolds obtenido fue de 469479 y el Mach de 0.07, comprobándose que existe flujo incompresible y turbulento en la zona de pruebas. De los perfiles de velocidad obtenidos con el honeycomb instalado en la cámara estabilizadora se observa que el flujo en la sección central de la zona de pruebas es uniforme, lo que se ve reflejado en el valor de la intensidad promedio de la turbulencia obtenido, el cual es del 3%, lo que significa que ésta se redujo en 2 puntos porcentuales con



respecto a cuándo se encontraban instaladas las mallas en el túnel de viento de la FCITEC.

Para el caso particular del perfil de velocidad ubicado al centro de la zona de pruebas medido en el eje “Y” (figura 10), el cambio en el comportamiento del flujo es notable, y mientras la intensidad de la turbulencia era del 6% cuando se encontraban instaladas las mallas, ahora con la instalación del honeycomb se tiene  $Tu = 0.02$ .

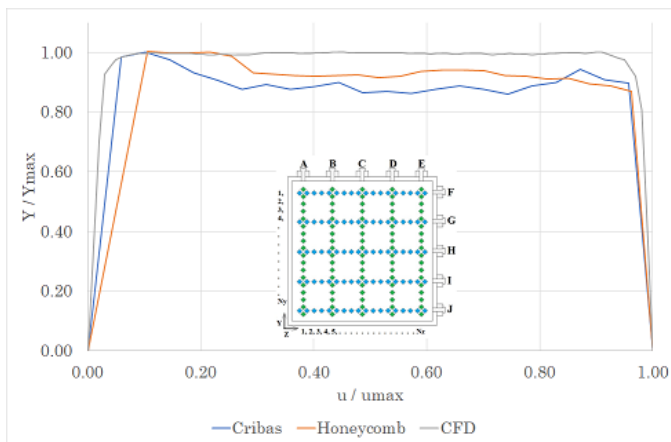


Figura 8. Perfiles de velocidad en sección A

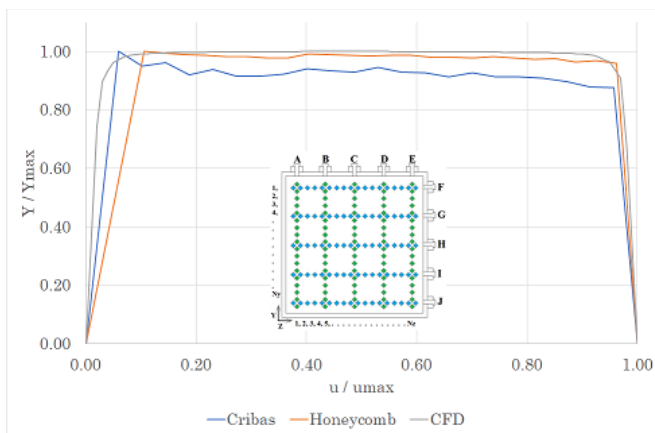


Figura 9. Perfiles de velocidad en sección B

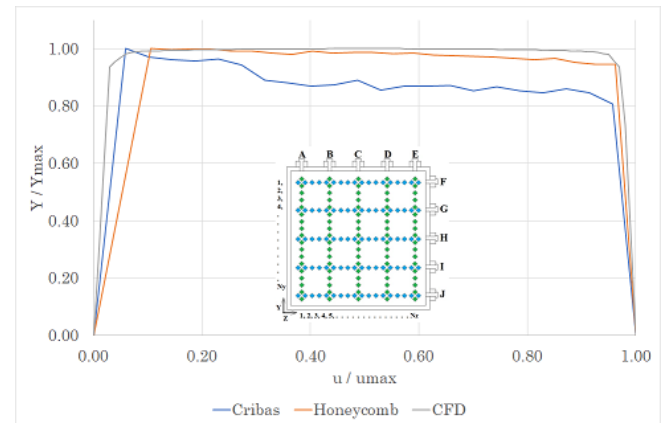


Figura 10. Perfiles de velocidad en sección C

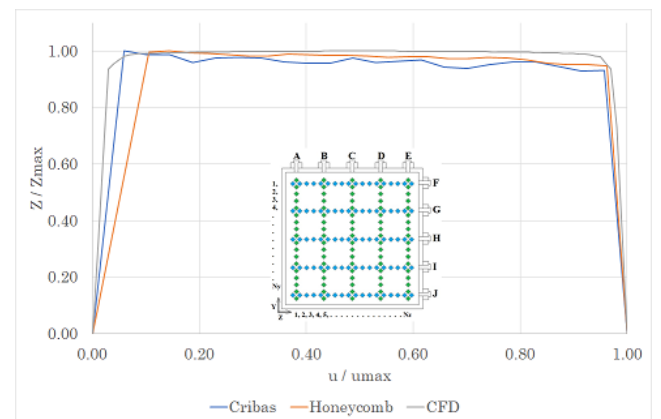


Figura 11. Perfiles de velocidad en sección H

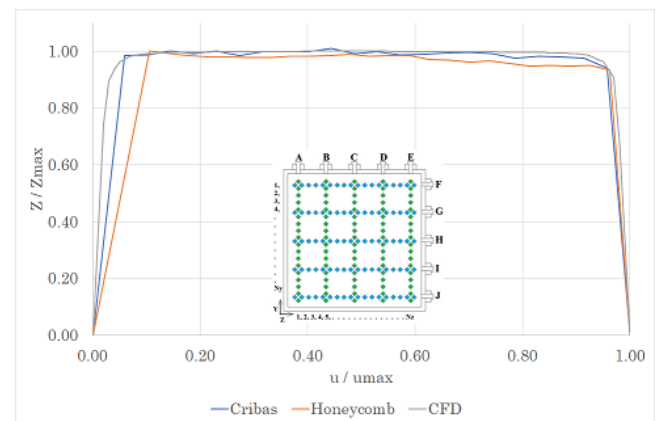


Figura 12. Perfiles de velocidad en sección I.

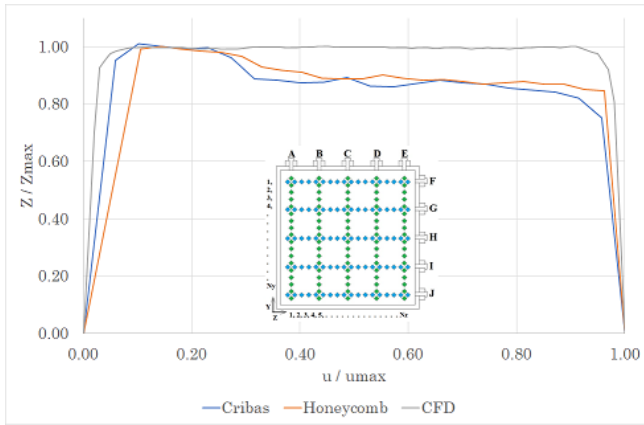


Figura 13. Perfiles de velocidad en sección J

Para los casos de los perfiles mostrados en las figuras 8 y 13, se observa un comportamiento irregular en los perfiles de velocidad, esto se debe a que los mismos se midieron a una distancia de 0.024m de la pared, por lo que existe una gran influencia de la capa límite en su comportamiento, debe recordarse que la zona de pruebas tiene una sección transversal cuadrada de 0.3m por lado, esta situación deberá resolverse ya que existe una variación importante al comparar los resultados con el análisis numérico, teniéndose una diferencia de hasta 18% en la velocidad promedio para los mismos puntos de medición. El comportamiento ideal del flujo uniforme en la zona de pruebas puede apreciarse en el campo de vectores obtenido numéricamente de la figura 14, debe destacarse la tridimensionalidad de los perfiles de velocidad en la zona de pruebas mostrada.

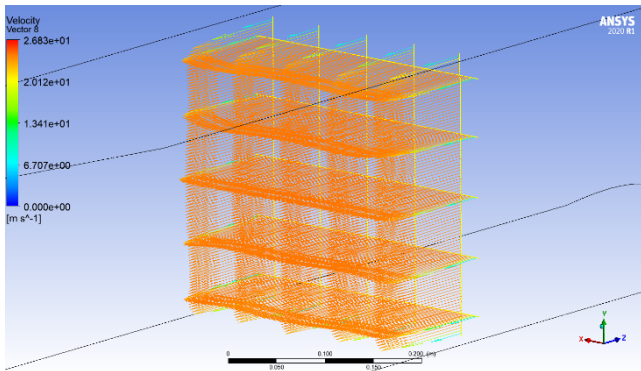


Figura 14. Vectores de velocidad en túnel de viento

De los resultados obtenidos puede asegurarse una zona de pruebas con flujo uniforme en la sección central de la misma de aproximadamente un 85%, tal como lo indican los perfiles de velocidad de las figuras 9, 10, 11 y 12, y deberá corregirse el comportamiento del flujo para la sección cercana a las paredes, por lo que será menester de trabajos futuros, agregar al menos un par de honeycomb en la cámara estabilizadora para intentar reducir la turbulencia del túnel de viento de la FCITEC.

## 5. Conclusiones

Se realizó un análisis numérico y experimental de los perfiles de velocidad en la zona de pruebas del túnel de viento de la FCITEC. La intensidad de la turbulencia en la zona de pruebas disminuyó en 3 puntos porcentuales en el centro de la zona de pruebas después del rediseño en la cámara estabilizadora. El honeycomb mejora las condiciones del flujo con respecto a la inserción de cribas en la cámara estabilizadora. La simulación numérica permite observar la tridimensionalidad del flujo y determinar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento del flujo cerca de las paredes.

## 6. Reconocimiento de autoría

Oscar Adrián Morales Contreras: Conceptualización, Ideas, Escritura y Borrador original; Administración del proyecto. Juan Antonio Paz González: Metodología, Investigación, Análisis formal; Escritura: revisión y edición. Mauricio Leonel Paz González: Metodología, Investigación, Análisis formal; Escritura: revisión y edición. Emigdia Guadalupe Sumbarda Ramos: Metodología, Investigación, Análisis formal; Escritura: revisión y edición. José Arciniega Martínez:



Metodología, Investigación, Análisis formal;  
Escritura: revisión y edición.

### Referencias

[1] T. Morel, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", *J. Fluids Engineering*, ASME Transactions, pp. 225-233, 1975. <https://doi.org/10.1115/1.3447255>

[2] L. Prandtl, "Attaining a Steady Stream in Wind Tunnel", NACA TM 726, 1933.

[3] Md. Arifuzzaman and Mohammad Mashud, Design Construction and Performance Test of a Low-Cost Subsonic Wind Tunnel, *Journal of Engineering*, vol 2, no.1, pp. 83-92, 2012. <https://doi.org/10.9790/3021-021058392>

[4] P. Rosas Quintero, "Caracterización del túnel de viento de velocidad baja del LABINTHAP", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2010.

[5] R. Loehrke and H. Nagib, "Control of Free Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation", *Journal of Fluids Engineering*, pp. 342-351, 1976. <https://doi.org/10.1115/1.3448313>

[6] R. Mehta and P. Bradshaw, "Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels", *The Aeronautical Journal*

of the Royal Aeronautical Society, no. 718, pp. 443-449, 1979.

[7] R. Peinado, "Sistema eléctrico y de control de potencia de un Túnel aerodinámico", Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2012.

[8] V. Kulkarni, N. Sahoo, S. Chavan, "Simulation of honeycomb-screen combination for turbulence management in a subsonic wind tunnel", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 99. No. 1, pp. 37-45, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.10.006>.

[9] O. Morales, A. Gómez, J. Paz. J. Navarro y J. Barboza, "Caracterización del túnel de viento subsónico de ECITEC-UABC", *R. Ingenierías*, vol. XXI, no. 80, 2018.

[10] J. Barlow, W. Rae and A. Pope, "Low speed wind tunnel testing", Ed. Jonh Wiley & Sons, INC. Third edition. pp. 90-91, 1999.

[11] J. Scheiman, "Considerations for the installation of Honeycomb and Screens to Reduce Wind-Tunnel turbulence", NASA, NASA Techn, 1981.

[12] ANSYS-Fluent, 2021, [Online] Available: <https://www.ansys.com/academic/students>

[13] The Gill Corporation, 2018, [Online] Available: <https://www.thegillcorp.com/>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Análisis de la base de datos abierta de Dirección General de Epidemiología haciendo uso de Deep Learning para la predicción de la necesidad de intubación en pacientes hospitalizados por COVID-19

## *Analysis of the open database of the General Directorate of Epidemiology using Deep Learning to predict the need for intubation in patients hospitalized for COVID-19*

Omar Fabián Rivera-Ceniceros<sup>ID</sup>, Luis Alberto Ordaz-Díaz<sup>ID</sup>

Universidad Politécnica de Durango, Carretera Durango-México Km. 9.5 S/N

**Autor de correspondencia:** Dr. Omar Fabián Rivera-Ceniceros, Universidad Politécnica de Durango, Carretera Durango-México Km. 9.5 S/N, México. E-mail: [omar.rivera@unipolidgo.edu.mx](mailto:omar.rivera@unipolidgo.edu.mx). ORCID: 0000-0002-4382-5737.

**Recibido:** 24 de Junio del 2021    **Aceptado:** 24 de Agosto del 2021    **Publicado:** 10 de Septiembre del 2021

**Resumen.** Haciendo el uso de aprendizaje profundo se busca determinar la probabilidad de que un paciente hospitalizado por COVID-19 padezca insuficiencia respiratoria y precise ser ventilado mecánicamente en una Unidad de Cuidados Intensivos (UCI). El análisis profundo se realiza mediante el entrenamiento del algoritmo de Redes Neuronales Secuenciales, ya que estas presentan una buena eficiencia en el análisis de datos abiertos. Para este estudio se tomó la base de datos abiertos de la Dirección General de Epidemiología. De acuerdo a los decretos oficiales de la federación las bases históricas y la información referente a los casos asociados a COVID-19 son de uso libre con el propósito de facilitar a todos los usuarios que la requieran, el acceso, uso, reutilización y redistribución de la misma. La base de datos de la Dirección General de Epidemiología presenta información varia que de acuerdo a entrevista con un médico de primera línea que trabaja con pacientes de COVID-19 y a su consideración algunos datos pueden ser irrelevantes, tal es el caso de la nacionalidad de los infectados, por mencionar alguno; de igual manera se trabajó solo con aquellos pacientes que dieron positivo a la enfermedad. Así mismo la base de datos puede servir para encontrar algunos otros aspectos o datos estadísticos relevantes sobre la pandemia en México.

**Palabras clave:** COVID-19; Lenguaje profundo; Redes neuronales secuenciales.

**Abstract.** Using deep learning, the aim is to determine the possibility that a patient hospitalized by COVID-19 suffers from respiratory failure and needs to be mechanically ventilated in a medical intensive care unit (ICU). The deep analysis is performed by training the Sequential Neural Networks algorithm, since these present good efficiency in the analysis of open data. For this study, the open database of the General Directorate of Epidemiology was used. According to the official decrees of the federation, the historical databases and the information related to the cases associated with COVID-19 are of free use with the purpose of facilitating access, use, reuse and redistribution to all users who require it. The database of the General Directorate of Epidemiology presents various information that, according to an interview with a first-line doctor who works with COVID-19 patients and in his opinion, some data may be irrelevant, as the nationality of people infected, to mention a few; likewise, we worked only with those patients who tested positive for the disease. In the same way, the database can be used to find some other aspects or relevant statistical data about the COVID-19 pandemic in México.

**Keywords:** COVID-19; Deep learning; Sequential neural networks.



## 1. Introducción

El acelerado crecimiento y expansión de esta cepa de COVID-19 impulso iniciativas para generar una producción de conocimiento publica sin precedentes encausada al entendimiento del virus con la finalidad de detenerla lo antes posible mediante desarrollo de vacunas y tratamientos médicos que ayuden a mejorar la velocidad de recuperación y baja la mortalidad [12:1], así como tratar de minimizar el uso de ventilación mecánica o asistida debido a la escasez de ventiladores de presión positiva adecuados para el uso en pacientes de COVID-19 [9].

En consecuencia, esta acelerada necesidad de publicación de investigadores, se ha generado una gran cantidad de conocimiento generado en un breve lapso de tiempo sin precedentes. Una de estas bases de datos está presente en la plataforma de la Dirección General de Epidemiología, donde se tiene una base con más de 3 millones de capturas en excel de casos relacionados de COVID-19 hasta inicios del 2021, base de datos donde se a considerando aquellos casos negativos, falsos positivos o positivos [1].

En los últimos años el uso de Machine Learning así como la minería de datos se ha popularizado mucho a la hora de trabajar con grandes cantidades de datos, es por eso que se pensó hacer uso de estas técnicas y herramientas para llevar a cabo la búsqueda de patrones y el análisis de esta basta base de datos que ofrece la Dirección General de Epidemiología sobre el COVID-19. Las redes neuronales artificiales y el Machine Learning son un modelo computacional que no es nuevo, si no que fue evolucionando a partir de diversas aportaciones científicas y en los últimos años se han producido avances que han reducido el trabajo mediante herramientas y lenguajes de programación de alto nivel open source [13: 331-332], así como herramientas en la nube que

permiten acceder a un mejor potencia computacional sin la necesidad de administrar la infraestructura, y en base a estas ventajas es que se pensó en usar estos modelos para llevar a cabo una búsqueda de patrones dentro de la información recabada, haciendo uso de la plataforma de servicio en la nube *Google Colab*® basada en notebooks de Jupiter.

### 1.1 Objetivo

El objetivo primordial de este proyecto es predecir si los pacientes ingresados a un hospital tienen la necesidad de hacer uso de ventiladores para casos graves de COVID-19 en base al análisis de la base de datos de la pandemia proporcionados por la Dirección General de Epidemiología [1], permitiendo comparar si la disponibilidad de los ventiladores será suficiente para atender todos los nuevos ingresos que lo requieran.

### 1.2 Alcances

El alcance del proyecto como su objetivo lo muestra, va evocado a la identificación de potenciales pacientes que requieran ser intubados con ventiladores especializados para casos de COVID-19, con la finalidad de que los hospitales puedan apoyarse para identificar la necesidad de estos ventiladores en pacientes que posean ciertas características identificadas dentro de la base de datos, teniendo en mente la posibilidad de dar tiempo a reaccionar en cuanto un paciente ingrese a la Unidad de Cuidados Intensivos o emergencias. Cabe mencionar que el objetivo de este proyecto no es abordar razones, temas o problemáticas sociales, falta de hospitales, etcétera; es simplemente abordar el tema desde un punto de vista técnico proponiendo hacer uso de los datos libres que se cuentan. Estos datos precisamente son de uso libre esperando que los investigadores realicen análisis y generen conocimiento que pueda ser aprovechado por pares.



## 2. Metodología

Como se ha expresado desde un principio, en una primera instancia esta investigación aborda la problemática de tratar de predecir si un paciente será asignado a un área de cuidados intensivos o no, y si existe la posibilidad de que el paciente requiera el uso de un respirador automático, que como se sabe, han sido escasos durante la pandemia, principalmente en los primeros meses, teniendo una gran problemática para atender a pacientes graves. El primer reto que se encontró fue la gran cantidad de información en una base de datos con casi tres millones doscientos mil casos registrados, habiendo entre estos registros personas que dieron falsos positivos, negativos y positivos.

Dado lo anterior y el objetivo general se optó por solo usar los registros de personas que hubiesen dado positivo a COVID-19, con lo anterior también se logró solventar el problema de que esta cantidad de registros sobrepasaba la capacidad de Excel para abrirlo (la base de datos es un archivo .xlsx), aun así quedaban muchos datos irrelevantes que fueron descartándose como: Estado de migración, si fue atendido en clínica privada o pública, fecha de registro e

ingreso, número de identificador, por mencionar algunas.

Estos datos que fueron descartados no fueron al azar y se pidió la colaboración de un médico de primera línea con maestría en ciencias forenses y geriatría, que ha estado atendiendo adultos mayores durante la pandemia, por solicitud de esta persona se omitirá su nombre. Al depurar los registros se dejaron datos importantes como enfermedades, edad, sexo, origen indígena o no, embarazo, etcétera dándoles importancia sobre todo a aquellos pacientes hospitalizados que fueron ingresados a la Unidad de Cuidados Intensivos y que requirieron el uso de respirador. Con este tratamiento a la base de datos se logró reducir la cantidad de información y se pasó de 3'194,264 registros al día de consulta, a tan solo 248,574. El posterior tratamiento que se le dio a la base de datos fue convertir los códigos empleados en el catálogo de la base de datos (tablas 1, 2 y 3) a datos más ordenados empezando por el cero, ya que en las pruebas de entrenamiento el algoritmo mostró mejoría en su aproximación al hacer estos cambios, a continuación, vemos algunas tablas de clasificación originales y posterior remplazo.

**Tabla 1.** SI-NO

| CLAVE | DESCRIPCIÓN     |
|-------|-----------------|
| 1     | SI              |
| 2     | NO              |
| 97    | NO APLICA       |
| 98    | SE IGNORA       |
| 99    | NO ESPECIFICADO |

**Tabla 2.** Sexo

| CLAVE | DESCRIPCIÓN     |
|-------|-----------------|
| 1     | MUJER           |
| 2     | HOMBRE          |
| 99    | NO ESPECIFICADO |

**Tabla 3.** Clasificación

| CLAVE | CLASIFICACIÓN |
|-------|---------------|
| 3     | CONFIRMADO    |
| 6     | SOSPECHOSO    |
| 7     | NEGATIVO      |



Las tablas de clasificación modificadas quedan de la siguiente forma:

**Tabla 3.** SI-NO

| CLAVE | DESCRIPCIÓN     |
|-------|-----------------|
| 0     | NO              |
| 1     | SI              |
| 2     | NO APLICA       |
| 3     | NO ESPECIFICADO |

**Tabla 4.** Sexo

| CLAVE | DESCRIPCIÓN |
|-------|-------------|
| 0     | HOMBRE      |
| 1     | MUJER       |

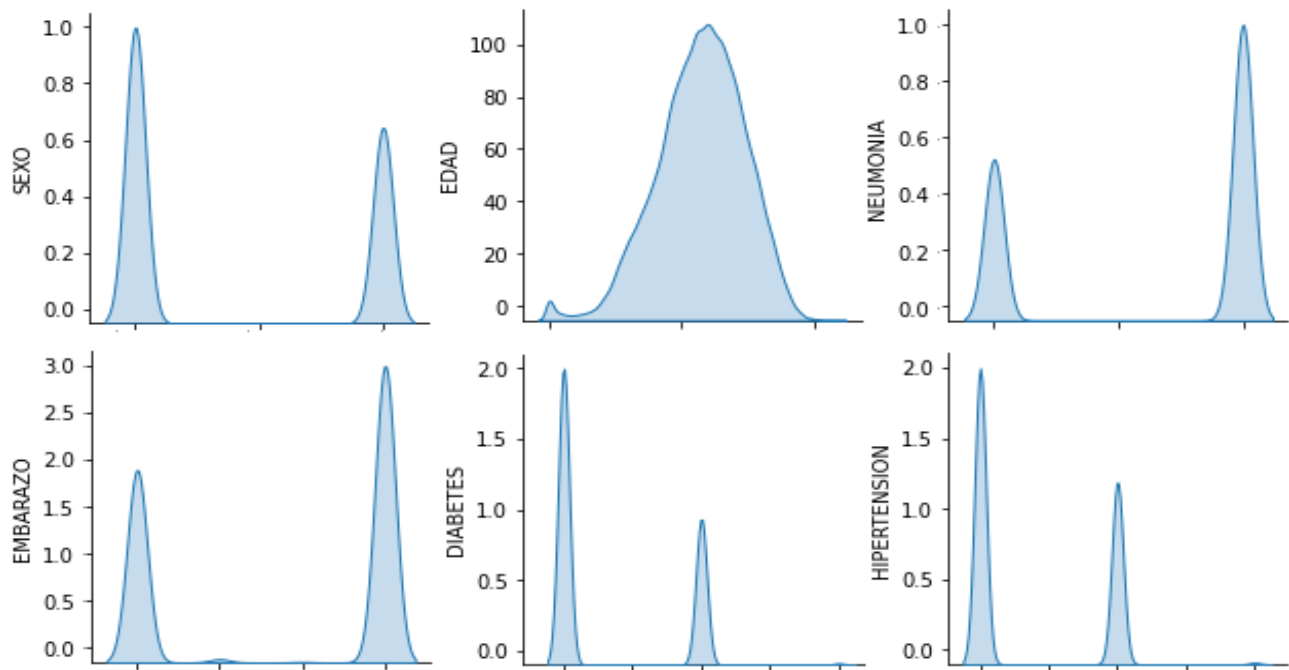
**Tabla 5.** Clasificación

| CLAVE | CLASIFICACIÓN |
|-------|---------------|
| 0     | NEGATIVO      |
| 1     | CONFIRMADO    |

Se usa la plataforma Colaboratory® o Colab donde se implementan la librerías adecuadas, entre ellas la librería de alto nivel *Keras* importando el modelo *Sequential* para permitir fácilmente describir las capas de la red neuronal artificial (RNA) con tipo de capa *Dense*, al usar esta plataforma se está utilizando *Tensorflow* como el motor que ejecutará la RNA

y la entrenará, se utilizó *numpy* para el manejo de arreglos, para llevar a cabo la graficación de los datos se importa la librería *seaborn*.

A continuación, en la figura 1 se muestra las gráficas de algunas columnas de los registros a partir de las modificaciones en la numeración de las clasificaciones.



**Figura 1.** Colección de 6 gráficas tomadas del set de datos.

El análisis de la base de datos se dividió en dos partes, una donde la salida de la RNA será predecir si el paciente será ingresado a la UCI y la otra parte si el paciente al estar en la UCI

requerirá de un respirador artificial o no. Colab utiliza las siguientes versiones de librerías (ver tabla 6):





Tabla 6. Librerías empleadas en el entorno de ejecución

| Librería   | Versión      |
|------------|--------------|
| Python     | 3.6          |
| Tensorflow | 2.5.0        |
| Keras      | 2.3.1        |
| Numpy      | 1.19.5       |
| Sklearn    | 0.22.2.post1 |
| Seaborn    | 0.11.1       |

## 2.1 Red Neuronal Secuencial

El tipo de RNA y la librería *Keras* con sus topologías de un modelo secuencial, así como la configuración de las capas fueron seleccionados por su simplicidad y desempeño en predicción con una clasificación binaria tomando en cuenta lo señalado en la bibliografía [14:372,374].

La base de datos debe convertirse a formato cvs para poder ser cargada en la plataforma, a continuación se muestra una miniatura de la base de datos cargada (figura 2).

|        | SEXO | EDAD | NEUMONIA | EMBARAZO | INDIGENA | DIABETES | EPOC | ASMA | INMUSUPR | HIPERTENSION | CARDIOVASCULAR | OBESIDAD | RENAL_CRONICA | TABAQUISMO | OTRA_COM | UCI |
|--------|------|------|----------|----------|----------|----------|------|------|----------|--------------|----------------|----------|---------------|------------|----------|-----|
| 0      | 1    | 33   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    | 0        | 0            | 0              | 0        | 0             | 0          | 0        | 0   |
| 1      | 1    | 33   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    | 0        | 0            | 0              | 0        | 0             | 0          | 0        | 0   |
| 2      | 1    | 33   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    | 0        | 0            | 0              | 0        | 0             | 0          | 0        | 0   |
| 3      | 1    | 33   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    | 0        | 0            | 0              | 0        | 0             | 0          | 0        | 0   |
| 4      | 1    | 33   | 0        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    | 0        | 0            | 0              | 0        | 0             | 0          | 0        | 0   |
| ...    | ...  | ...  | ...      | ...      | ...      | ...      | ...  | ...  | ...      | ...          | ...            | ...      | ...           | ...        | ...      | ... |
| 248569 | 0    | 73   | 0        | 3        | 0        | 1        | 0    | 0    | 0        | 1            | 1              | 0        | 0             | 1          | 0        | 0   |
| 248570 | 1    | 58   | 1        | 0        | 0        | 0        | 0    | 0    | 1        | 0            | 0              | 1        | 0             | 0          | 1        | 0   |
| 248571 | 1    | 74   | 1        | 0        | 0        | 1        | 0    | 0    | 0        | 1            | 1              | 0        | 1             | 0          | 1        | 0   |
| 248572 | 1    | 74   | 1        | 0        | 0        | 1        | 0    | 0    | 0        | 1            | 0              | 0        | 1             | 0          | 0        | 0   |
| 248573 | 0    | 4    | 0        | 3        | 0        | 0        | 0    | 0    | 0        | 0            | 0              | 0        | 1             | 0          | 0        | 0   |

248574 rows x 16 columns

Figura 2. Base de datos cargada en Colab.

Cargado el set de datos lo primero que se realiza es definir las entradas (x) y la salida (y), a continuación, se describirán algunos aspectos del programa en Python.

```
x= COVID.iloc[:, :-1] #La última
columna es seleccionada como salida
y= COVID.iloc[:, 15].values #las
anteriores 15 columnas son entradas
```

Se crean los datos a entrenar y los datos de prueba a partir de las entradas y salida.

```
X_train,X_test,y_train, y_test = train
n_test_split(x, y, test_size = .2, ra
ndom_state = 1)
```

Posteriormente son definidas las capas de entrada, las capas ocultas y la capa de salida, la selección de la configuración de las capas fue basada en la bibliografía antes citada, las activaciones de las capas quedan de la siguiente manera, donde se consideraron 4 capas ocultas, ya que incrementar el número de capas no mejoraba la predicción, se activaron con función



RELU al tratarse de una función de uso general con datos positivos:

```
entrada_secuencial =  
keras.Input(shape=(15,)) #shape 15  
corresponde al número de columnas  
  
x=layers.Dense(15,activation="relu") (  
entrada_secuencial)  
  
x2=layers.Dense(50,activation="relu")  
(x)  
  
x3=layers.Dense(50,activation="relu")  
(x2)  
  
x4=layers.Dense(75,activation="relu")  
(x3)  
  
salida_final=layers.Dense(2,activation="softmax") (x4) #Salida
```

Aumentar la capa oculta y las neuronas (hasta 75 neuronas) no incrementa la eficiencia de la red neuronal, por eso se mantienen las 4; para la capa de salida, dado que solo se tiene como salida un 0 y 1 que representa la necesidad de intubación o no, o la necesidad de ingresar al paciente en la UCI se emplea una activación Softmax de densidad 2. Para compilar el modelo, se emplea una optimización tipo ADAM y una función de pérdida de tipo **crossentropy** dado que como se ha escrito, se pretende predecir un valor binario

que indica como salida un valor que representa Falso o Verdadero, Si o No.

```
model = keras.Model(inputs=entrada_secuencial, outputs=salida_final,name="COVID_model")  
  
model.compile(optimizer="adam", loss="sparse_categorical_crossentropy", metrics=["accuracy"])
```

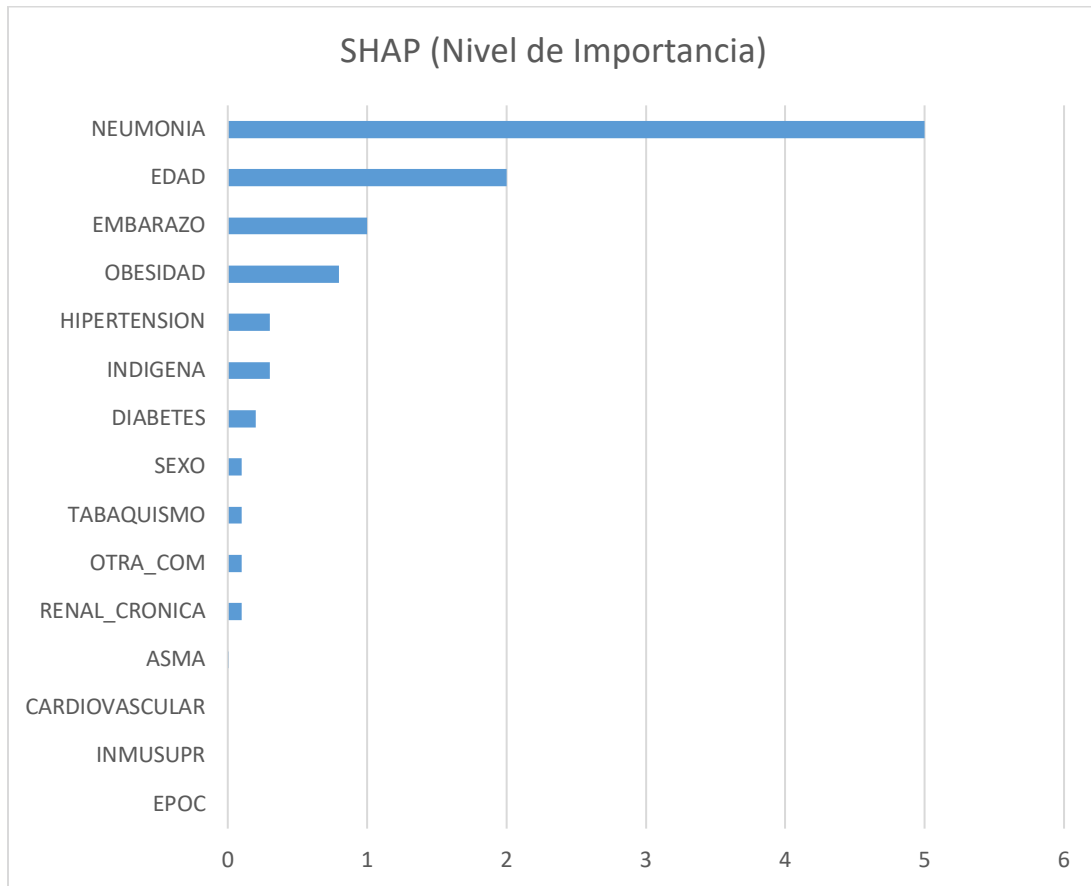
Para el entrenamiento fue suficiente con 5 épocas, se agregó hasta 50 épocas como prueba y esto tampoco mejoró la respuesta:

```
model.fit(X_train, y_train, epochs=5, batch_size=1024)
```

Para determinar las variables a emplear al evaluar la red neuronal se emplearon distintas comparaciones y librerías.

Para averiguar qué variables tienen más influencia en las predicciones se utilizó el framework SHAP, que permitirá visualizar la importancia de las características y su impacto en la predicción de si un paciente será intubado.

El framework SHAP proporciona visualizaciones intuitivas e interactivas que apuntan a mostrar qué características son más relevantes.



Gráfica 1. Grafica de barras de la importancia de características empleando SHAP.

```
model.fit(X_train, y_train)
explainer = shap.TreeExplainer(model)
shap_values = explainer.shap_values(X_train)
shap.summary_plot(shap_values, x, plot_type='bar')
```

El árbol de decisión tuvo las siguientes características: Profundidad del árbol: 6, Número de nodos terminales: 64

### 3. Resultados

La red neuronal se entrena con 5 épocas para cada uno de los dos análisis (necesidad de intubación e ingreso a UCI), A continuación, se muestran los resultados para determinar la necesidad de ingreso a la Unidad de Cuidados Intensivos

```
Epoch 1/5
195/195 [=====] - 2s 6ms/step - loss: 0.5021 - accuracy: 0.7864
Epoch 2/5
195/195 [=====] - 1s 6ms/step - loss: 0.2860 - accuracy: 0.9159
Epoch 3/5
195/195 [=====] - 1s 6ms/step - loss: 0.2846 - accuracy: 0.9149
Epoch 4/5
195/195 [=====] - 1s 6ms/step - loss: 0.2804 - accuracy: 0.9143
Epoch 5/5
195/195 [=====] - 1s 6ms/step - loss: 0.2753 - accuracy: 0.9161
loss: 0.2753 - accuracy: 0.9161
```

El resultado para la necesidad de ser intubado por un paciente de COVID-19 tuvo como respuesta:



loss: 0.3802 - accuracy: 0.8572

Teniendo un 91% de eficiencia para predecir si un paciente ingresara a la Unidad de Cuidados Intensivos y 85% de uso de respirador.

Ambos modelos fueron evaluados con las entradas originales de la base de datos, con los datos de prueba y los datos de entrenamiento generados, en todos los casos la respuesta de la evaluación arrojaba la misma “perdida” y la misma “precisión” tal y como se mostró anteriormente.

```
model.evaluate(X_train,y_train)====>
accuracy: 0.8567
model.evaluate(X_test,y_test) ====>
accuracy: 0.8537
model.evaluate(x,y) ====> accuracy:
0.8551
```

Se utilizó la **validación cruzada** para evaluar los resultados del análisis y garantizar que los datos son independientes de la partición entre datos de entrenamiento y los de prueba.

```
clf = svm.SVC(kernel='linear', C=1).fit(X_train, y_train)
clf.score(X_test, y_test) =
0.915236850045258
```

Para probar la red neuronal con datos que se puedan ingresar se hace mediante un arreglo que represente de forma ordenada en cada posición los datos y enfermedades a evaluar, en la

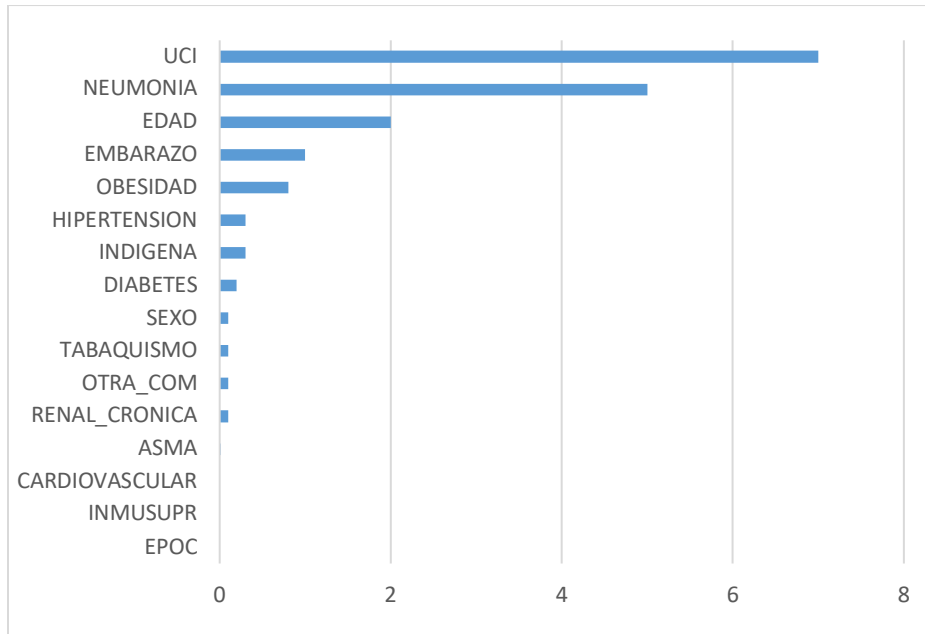
siguiente lista se muestra en orden de posición las enfermedades y consideraciones a evaluar:

Sexo, Edad, Neumonía, Embarazo, Indígena, Diabetes, Epoc, Asma, Inmuno supresora, Hipertensión, Cardiovascular, Obesidad, Enfermedad Renal Crónica, Tabaquismo, Otra Condición, para entender los valores numéricos hay que ver la tabla 3 y 4.

A continuación, se muestra cómo se puede predecir ingresando los datos en el arreglo.

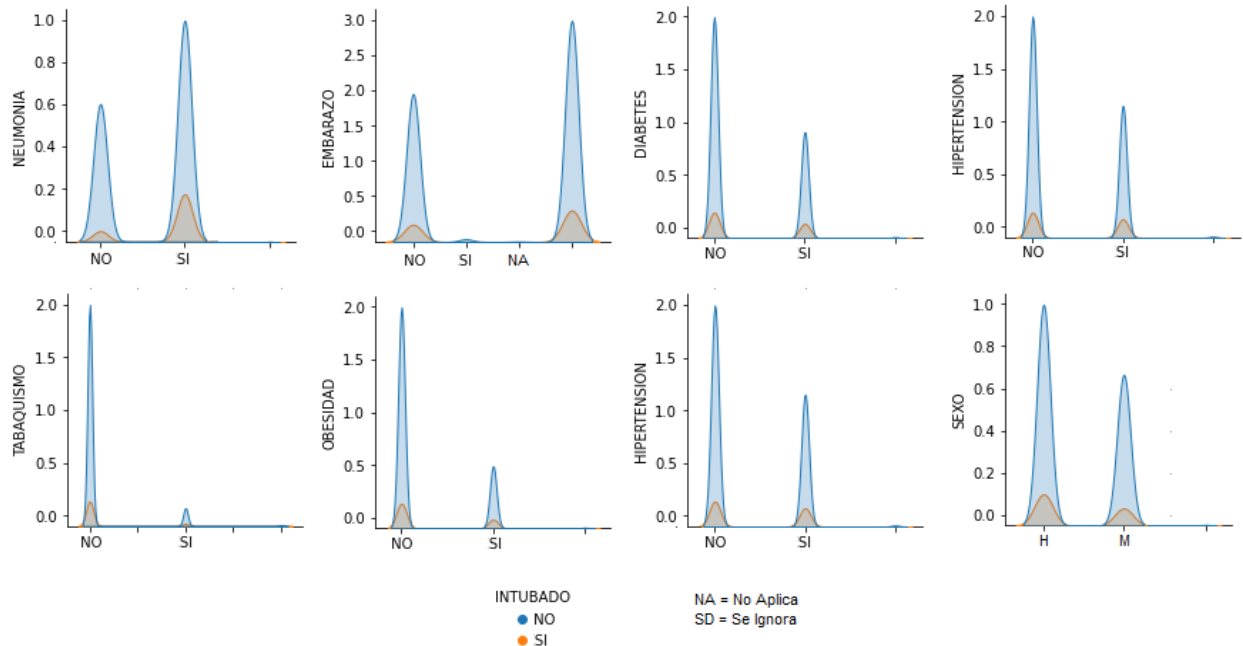
```
a=np.array([[1, 56, 0, 2, 1, 0, 0
, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0]]) #SEX
0 [0 = Hombre, 1 = Mujer]. GENERAL [
0 = NO, 1 = SI, 2 = se ignora, 3 = No
Aplica o se ignora,
b= model.predict(a)
Posibilidad de entrar al UCI = 96.0%
Posibilidad de no presentar problemas
= 4.0%
Posibilidad de usar respirador =
61.0%
Posibilidad de no usar respirador =
39.0%
```

Al ingresar valores que corresponden a diferentes sexos, enfermedades, etcétera, se pudo determinar si el paciente será ingresado o no al UCI y si este requerirá se intubado, y de igual manera se visualizó mediante SHAP la importancia de predecir si un paciente al ser ingresado a la Unidad de Cuidados Intensivos y su relación con la posibilidad de ser Intubado como lo vemos en la siguiente gráfica de barras.



Grafica 2. Impacto de ingreso a la Unidad de Cuidados Intensivos con la posibilidad de ser Intubado.

En la gráfica 3, se puede apreciar algunas de las variables y su relación si una persona será intubada o no de acuerdo al análisis.



Grafica 3. Relación de pacientes de COVID-19 y su posibilidad de ser intubado.



También con estos datos se han encontrado otros datos de importancia como:

1. Un hombre adulto joven con hipertensión tiene más posibilidades de usar respirador que uno que no padece hipertensión hasta en un 6%, pero en adultos mayores con hipertensión solo es un 3%

2. Se ha encontrado que aquellos pacientes que no son ingresados al UCI tienen mayor posibilidad de requerir el uso de ventilador artificial.

3. Un hombre de 25 años con hipertensión ingresado en el UCI tiene una posibilidad de usar respirador del 61.0%, pero una mujer de 25 años con los mismas condiciones tiene la posibilidad de usar respirador de un 49.0%

4. Un hombre de 50 años con hipertensión ingresado en el UCI tiene una posibilidad de usar respirador del 57.0%, pero un hombre con los mismos síntomas pertenece a la comunidad indígena puede tener de 8% más posibilidades de necesitar respirador, además una mujer indígena tiene 3% más probabilidad de usar respirador que una mujer de área urbana.

5. Tanto un hombre joven adulto menor a 30 años como un adulto mayor de 60 años diabéticos tienen alta posibilidad de ser intubados (98%) en caso de ingresar al UCI, pero el adulto mayor tiene un 4% menos de probabilidad de usarlo

6. Una mujer adulto mayor diabética tiene 10% menos probabilidades de ser intubada que un varón adulto mayor, y 6% menos que una mujer adulto joven menor de 30 años.

7. Sin embargo los puntos anteriores se reducen drásticamente hasta un 46% de probabilidad de usar respirador artificial si el paciente tiene la posibilidad de ingresar al UCI si el médico dictamina que requiera entrar y hay disponibilidad.

Pero aquellos que por cualquier motivo no tienen la posibilidad de ingresar al UCI y recibir los medicamentos y tratamiento adecuado, tiene más

probabilidad de usar respirador, sobre todo en personas del género masculino.

8. De acuerdo al análisis realizado, el factor más importante para determinar si un paciente será intubado o no es si padece Neumonía.

#### **4. Conclusiones y observaciones**

Al correr el análisis de la base de datos de COVID-19 se puede llegar a varias conclusiones y observaciones:

1) Con este set de datos analizados se encontró una predicción con un porcentaje alto de eficiencia que permita determinar si una persona será intubada o no, sin embargo también será bueno considerar el uso de radiografías del paciente como complemento al análisis, ya que analizar solamente la base de datos para determinar que una persona requiera ayuda mediante un respirador artificial pudiera ser insuficiente en el remoto caso que se presente un paciente con los mismos antecedentes, y este pudiera no haber requerido hacer uso de un respirador [16], donde incluso se puede hacer un análisis por Deep Learning de tales imágenes tal y como algunos investigadores lo han hecho [17]. 2) El análisis por aprendizaje profundo realizado en este proyecto no arrojó nuevos descubrimientos y observaciones hechas en investigaciones realizadas por otros investigadores, pero si ha servido para corroborar algunos hallazgos que otros han encontrado ya sea mediante observación u otros análisis estadísticos tales como:

Las investigaciones en México han observado que las comunidades indígenas tienen mayor posibilidad de infección por COVID-19, dicha observación se puede corroborar con este proyecto al arrojar como resultado que una persona perteneciente a una comunidad indígena tienen un 8% más de posibilidades de sufrir contagio y ser intubado, comparando esto con las observaciones obtenidas en la publicación



del índice de vulnerabilidad municipal por COVID-19 [8]. Donde al buscar los municipios con más presencia de comunidades indígenas como el Mezquital, Dgo, se puede observar un mayor índice de contagio.

Otra observación que ha sido corroborada por esta investigación es sobre el estudio publicado el 26 de agosto de 2020 en la revista *Nature* y que ofrece posibles explicaciones biológicas de por qué los hombres son más propensos a padecer cuadros severos de la COVID-19 que las mujeres tal y como se muestra en los resultados de esta investigación.

3) La hipertensión sobre todo en adultos jóvenes juega un papel importante en la necesidad de uso de un ventilador, ya que al estar presente este padecimiento se tiene mayor posibilidad de tener que ser intubado.

4) Ser atendido en una Unidad de Cuidados Intensivos también juega un papel crítico, ya que aquellos que no tuvieron la posibilidad por diversas razones de ser atendidos en una Unidad de Cuidados Intensivos pero presentaron un caso grave de COVID-19 tiene hasta un 20% más de probabilidades de ser intubados, llegando hasta un 96% de posibilidad de ser intubado de acuerdo a los resultados encontrados.

5) Se puede observar desde un principio la deficiencia en algunos aspectos en la captura de datos de la DB proporcionada por el sistema nacional de epidemiología, se pondrá como ejemplo el estado de Durango (lugar de procedencia del autor) que cuenta con 39 municipios, la base de datos del COVID-19 cuenta con un código numérico para cada municipio del país, sin embargo en el estado de Durango durante la revisión de los datos se encontraron códigos correspondientes a municipios ajenos al estado, dichos errores claramente son humanos ya que si se buscan estos códigos en la base de datos se nota que los números pertenecen a municipios con nombres parecidos a municipios del estado mencionado.

6) Es fundamental que los pacientes ingresen a cuidados intensivos donde de acuerdo a los resultados y la experiencia de la doctora entrevistada, al parecer al ingresar al UCI, los pacientes recibirán mayor atención y medicamentos, siendo esto es un factor determinante en la posibilidad de usar respirador o no de acuerdo a la doctora, ya que en base a los resultados entre menores cuidados se tenga, al paso de los días aumentará más la posibilidad de usar ventilador.

7) Se confirma de acuerdo a la bibliografía [15] que las mujeres tiene un sistema inmunológico superior al del hombre, aunque varía entre 2% y 4% de acuerdo a la edad.

Cabe mencionar que todo el análisis anterior se realizó en pacientes no ambulatorios, es decir, pacientes hospitalizados en hospitales públicos y privados de México, por lo que estos resultados, conclusiones y observaciones pueden variar de país a país de acuerdo a distintos factores como estilo de vida.

## 5. Reconocimiento de autoría

*Omar Fabián Rivera Cenicerros:* Conceptualización, Ideas, Metodología, Análisis formal, Escritura y Borrador original; Administración del proyecto. *Luis Alberto Ordaz Díaz:* Ideas, Investigación, Escritura: revisión y edición.



### Referencias

- [1] Dirección general de Epidemiología. Datos Abiertos Dirección General de Epidemiología, Internet: <https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-152127> [7, enero, 2021].
- [2] J. Pearce. (2020, Abril). "A Review of Open-Source Ventilators For COVID-19 And Future Pandemics,". F1000Research, 9:218. Disponible <https://doi.org/10.12688/f1000research.22942.2>, [Feb. 12, 2021].
- [3] E. Tse, D. Klug y M. Todd. (2020, Oct.). "Open science approaches to COVID-19," F1000Research, 9:1043. Disponible: <https://doi.org/10.12688/f1000research.26084.1>, [Feb. 13, 2020].
- [4] A. Väänänen, K. Haataja, K. Vehviläinen-Julkunen y P. Toivanen. (2021, Marzo). "Proposal of a novel Artificial Intelligence Distribution Service platform for healthcare," F1000Research, 10:245. Disponible: <https://doi.org/10.12688/f1000research.36775.1> [Abril 8, 2021].
- [5] C. Castillo, C. Valdivia, C. Osorio et al. (2021, Enero). 4th ISCB Latin American Student Council Symposium: "A virtual and inclusive experience during COVID-19 times," F1000Research, 9:1460, Disponible: <https://doi.org/10.12688/f1000research.28330.1> [Abril 15, 2021].
- [6] M. Capistran, A. Capella, J. Christen (2020, Junio). "Forecasting hospital demand during COVID-19 pandemic outbreaks," arXiv:2006.01873, Disponible: <https://arxiv.org/abs/2006.01873> [Enero 20, 2021].
- [7] J. Rao, H. Zhang y A. Mantero. (2020, Mayo). "Contextualizing COVID-19 spread: a county level analysis, urban versus rural, and implications for preparing for the next wave". F1000Research, 9:418. Disponible: <https://doi.org/10.12688/f1000research.23903.1> [Abril 15, 2021].
- [8] R. Sierra. "Índice de vulnerabilidad municipal a COVID-19," CONABIO, CIMAT. Guanajuato. Reporte Técnico, Núm. 2, 14 de julio de 2020 [Abril 19, 2021].
- [9] R. Casado. "Respiradores frente al COVID-19: Diferentes tipos para cada situación." Revista EFE:SALUD, 24 de Abril de 2020 [Abril 19, 2021].
- [10] RGT consultores. "El Sistema Respiratorio y el COVID-19", Internet: <https://rgtconsultores.mx/blog/el-sistema-respiratorio-y-el-COVID-19-parte-1>, 12 de mayo de 2020 [Diciembre 20, 2020].
- [11] RGT consultores. "Ventiladores Mecánicos ante el COVID-19", Internet: <https://rgtconsultores.mx/blog/ventiladores-mecanicos-ante-el-COVID-19>, 20 de mayo de 2020 [Diciembre 20, 2020].
- [12] R, Ortiz, (2020, Oct.). "Análisis métrico de la producción científica sobre COVID-19 en SCOPUS". Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud, vol.31 no.3 e1587. Epub 30 de octubre de 2020. Disponible: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2307-21132020000300002&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2307-21132020000300002&lng=es&tlng=es). [Diciembre 17. 2020].
- [13] J, VanderPlas. "Python Data Science Handbook ". O'Reilly Media, Inc., 2015, 1005





**Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 4 (3): 195-207**

Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472. pp. 331-332, 359-462.

[14] A. Gulli, P. Sujit. "Deep Learning with Keras". Packt Publishing Ltd, 2017, Livery Place, 35 Livery Street, Birmingham, UK. pp. 368-422.

[15] M. Rodríguez. "COVID-19: ¿es el sistema inmunológico de las mujeres más robusto que el de los hombres? (y los interesantes hallazgos que se están dando por el coronavirus)". Internet:

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-54344789>. Octubre 2020, [Mayo 17, 2021].

[16] F. Petite, M. Rivera, J. San Miguel, Y. Malo., J. Flores, M. Cuartero (Abril 9, 2021). Initial findings in chest X-rays as predictors of worsening lung infection in patients with COVID-19: correlation in 265 patients. Radiology, S0033-8338(21)00081-3. Elsevier Public Health Emergency Collection. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2021.03.004>, [Mayo 17, 2021].



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Determinación de fallas en transformadores de potencia inmersos en aceite mineral aislante basándose exclusivamente en el DGA y mediante la evaluación del NEI

## *Determination of faults severity in power transformers immersed in mineral insulated oil based exclusively on the DGA and by evaluating the NEI*

Bethsaida Adriana Gutiérrez Chávez<sup>1</sup>, Georgina Montes de Oca-Ramírez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado Maestría en Manufactura Avanzada, Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A.C.), Unidad Estado de México. Circuito de la Industria Pte. Lte.11. Mza.3 No. 11. Parque Industrial Ex hacienda Doña Rosa, Lerma, Estado de México. CP 52004. México

<sup>2</sup>Especialidad de Plásticos y Materiales Avanzados, Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A.C.), Unidad Estado de México. Circuito de la Industria Pte. Lte.11. Mza.3 No. 11. Parque Industrial Ex hacienda Doña Rosa, Lerma, Estado de México. CP 52004. México

**Autor de correspondencia:** Bethsaida Adriana Gutiérrez Chávez, osgrado Maestría en Manufactura Avanzada, Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A.C.), Unidad Estado de México. Circuito de la Industria Pte. Lte.11. Mza.3 No. 11. Parque Industrial Ex hacienda Doña Rosa, Lerma, Estado de México. CP 52004. México. E-mail: bagutierrezch89@gmail.com. ORCID: 0000-0002-9302-687X.

**Recibido:** 15 de Mayo del 2021

**Aceptado:** 12 de Julio del 2021

**Publicado:** 27 de Septiembre del 2021

**Resumen.** - Los transformadores de potencia son un componente importante de las redes eléctricas, por lo que resulta necesario conocer su estado a fin de dar solución a las fallas incipientes. La técnica Análisis de Gases Disueltos (DGA) es ampliamente utilizada para el diagnóstico de fallas de estos equipos, sin embargo, los resultados no son concluyentes ya que no se conoce con exactitud la severidad de las fallas detectadas. En estudios recientes se reporta una manera de evaluación "Normalized Energy Intensity (NEI)" (Jakob & Dukarm, 2015), la cual incorpora la teoría termodinámica a la degradación del aceite mineral. En este artículo se realiza el análisis de 24 transformadores de potencia que operan bajo distintas condiciones, realizando una evaluación comparativa de las técnicas de interpretación DGA y NEI para evaluar la severidad de las fallas detectadas. El resultado obtenido fue un diagnóstico más certero de los transformadores previo a presentar fallas mayores. Se determinó que la técnica interpretativa NEI es más sensible al DGA, permitiendo que la cuantificación de la severidad de la falla del transformador sea más aproximada al estado real de la degradación de aceite mineral aislante.

**Palabras clave:** Transformador de potencia; Aceite mineral aislante; Análisis de gases disueltos (DGA); Normalized energy intensity (NEI); Entalpía.

**Abstract.** - Power transformer is a major part electric system, it is necessary to know their condition in order to solve incipient faults, DGA technique in mineral insulated oil is widely used to diagnose the equipment, however is not easy to interpret the results because it is hard to know the severity of the detected fault. Recent studies mention a way to evaluate it called "Normalized Energy Intensity" (Jakob & Dukarm, 2015) which incorporates the thermodynamic theory to the descomposition of mineral insulated oil. In this article, the analysis of 24 power transformers operating under different conditions was considered to do a comparative study between Dissolved Gas Analysis and Normalized Energy Intensity interpretation techniques in order to evaluate the severity of the detected faults. The obtained result was a more accurate diagnosis of the transformers before presenting major failures. It was determined that the interpretative technique NEI is more sensitive to DGA, allowing that the quantification of the transformer fault severity to be closer to the insulated mineral oil real condition degradation.

**Keywords:** Power transformer; Mineral insulating oil; Dissolved gas analysis (DGA); Normalized energy intensity (NEI); Enthalpy.



## 1. Introducción

Los transformadores de potencia sumergidos en aceite mineral aislante son una parte esencial del sistema eléctrico, pues gracias a estos es posible la transmisión y distribución de la energía eléctrica por lo que es de gran importancia mantenerlos en condiciones aptas de operación. El constante trabajo y las diferentes condiciones ambientales, eléctricas y mecánicas provocan el deterioro de los transformadores y eventualmente la aparición de fallas.

Una falla catastrófica en un transformador puede terminar en un accidente, el sistema puede ser dañado generando grandes pérdidas económicas y daños sociales, por lo que resulta importante detectar las fallas potenciales en esos equipos [1].

El objetivo de emplear aceite en un transformador es proporcionar aislamiento eléctrico a las distintas zonas del equipo, además de actuar como una capa de revestimiento protectora que previene la oxidación de las superficies metálicas. Otra función relevante es también mejorar la disipación de calor [2].

Las estadísticas de fallas que ocurren en los transformadores de potencia muestran que el 41% se relacionan con el cambiador de derivaciones, 19% con los devanados, 3% con el núcleo, 12% con los bushings, 13% con el tanque y fluidos y 12% con accesorios [3].

Las fallas pueden ser identificadas y evitadas mediante distintas técnicas de mantenimiento predictivo. El Análisis de Gases Disueltos (DGA) es una técnica confiable para la detección de fallas incipientes en transformadores inmersos en aceite, a través del análisis de la concentración de gases disueltos, de sus tasas y relaciones, los métodos DGA pueden determinar el tipo de falla. Los gases comúnmente colectados y analizados

son: hidrógeno ( $H_2$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), etano ( $C_2H_6$ ), metano ( $CH_4$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ) [4].

### *Importancia y desafíos de las técnicas para interpretar Análisis de Gases Disueltos*

La probabilidad de fallas incrementa significativamente con el envejecimiento del transformador, por lo que es importante contar con alguna herramienta de diagnóstico confiable que identifique el estado actual para realizar las acciones correctivas adecuadas y así evitar fallas catastróficas [5].

Existen distintas técnicas para la detección de fallas incipientes en transformadores inmersos en aceite mineral aislante. La técnica más conocida es el Análisis de Gases Disueltos (DGA), la cual consiste en la obtención de una muestra de aceite de un transformador en servicio para cuantificar las concentraciones de algunos compuestos ligeros específicos durante la descomposición de las moléculas disueltas en fase líquida [6].

Para la medición de DGA se realiza la extracción del gas problema mediante las técnicas descritas en “*Guide for the sampling of gases and of oil-filled electrical equipment and for analysis of free and dissolved gases*” (IEC 60567) [7]. Una vez extraído el gas, es analizado mediante cromatografía de gases siguiendo la norma ASTM D 3612-02 [8].

El análisis de los niveles y proporciones de los gases combustibles disueltos en transformadores inmersos en fluidos, ha sido una de las técnicas más importantes disponibles para diagnosticar posibles fallas incipientes en transformadores. Con base en el DGA, han surgido diversas técnicas interpretativas para detectar las fallas en transformadores, sin embargo, producen resultados discrepantes. Uno de los desafíos para



la determinación de fallas en los transformadores es que no es posible cuantificar la severidad total de la falla dependiendo exclusivamente del DGA ya que la interpretación no es concluyente [9].

Considerando lo descrito en la Guía IEEE Std C57.104-2008, cuando se presentan aumentos repentinos de las concentraciones de gases combustibles en transformadores que operan con normalidad y se sospecha que hay una falla interna se utiliza la clasificación de condiciones que se observa en la Tabla 1.

En la Tabla 2 se observan los límites de las concentraciones de gases combustibles disueltos en el aceite mineral y el total de gases combustibles disueltos (TDCG) y con ello, se clasifica en condición 1, 2, 3 o 4 como se muestra en la Tabla 1. La Tabla 2 es ampliamente utilizada para la evaluación de la condición de los gases en los transformadores, los operadores de los transformadores pueden elegir si utilizan las distintas concentraciones de gases disueltos para los gases individuales y o para TDCG [10].

(hidrógeno, metano, etano, etileno y acetileno) para determinar las fallas, las relaciones son:

- Ratio 1 (R1) =  $CH_4/H_2$
- Ratio 2 (R2) =  $C_2H_2/C_2H_4$
- Ratio 3 (R3) =  $C_2H_2/CH_4$
- Ratio 4 (R4) =  $C_2H_6/C_2H_2$
- Ratio 5 (R5) =  $C_2H_4/C_2H_6$

**Doernenburg ratio method.** Esta técnica indica la existencia de tres tipos de falla y utiliza las concentraciones de los gases para establecer 4 relaciones entre ellos (R1, R2, R3, R4) las cuales son comparadas con concentraciones especiales determinadas. Una desventaja del método es que se requiere una concentración significativa de gases disueltos en el aceite mineral para que las relaciones puedan ser aplicadas [10].

**Tabla 1.** Asignación de severidad de falla según la condición

| Condición | Falla  |
|-----------|--|
| 1         | El transformador opera satisfactoriamente                              |
| 2         | Niveles más altos de lo normal   |
| 3         | Altos niveles de descomposición  |
| 4         | Descomposición excesiva, si continúa operando ocurrirá una falla grave |

DGA es una de las técnicas más utilizadas para detectar fallas y con base en ello, existen distintos métodos para diagnosticar el estado del transformador, por ejemplo:

En la Guía IEEE Std C57.104-2008 se menciona que algunas teorías basadas en principios de degradación térmica (*Doernenburg ratio method* y *Rogers ratio method*) utilizan relaciones establecidas de gases combustibles clave



Tabla 2. Concentraciones límite de gases disueltos

| Condición | Límites de concentración de gases disueltos [ $\mu\text{L/L}$ (ppm)] |               |                        |                        |                        |             |               |
|-----------|--|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------|---------------|
|           | $\text{H}_2$   | $\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_2$ | $\text{C}_2\text{H}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{CO}$ | $\text{CO}_2$ |
| 1         | 100  | 120           | 1                      | 50                     | 65                     | 350         | 2500          |
| 2         | 101-700  | 121-400       | 2-9                    | 51-100                 | 66-100                 | 351-570     | 2500-4000     |
| 3         | 701-1800   | 401-1000      | 10-35                  | 101-200                | 101-150                | 571-1400    | 4001-10000    |
| 4         | >1800  | >1000         | >35                    | >200                   | >150                   | >1400       | >10000        |

**Rogers ratio method.** Se basa en las relaciones (R1, R2 y R5) para determinar las fallas. Este método no depende de las concentraciones de un gas para que el diagnóstico sea significativo, sin embargo, solo puede ser aplicado cuando las concentraciones de los gases individuales rebasan los límites máximos [10].

**Key Gases Method.** Basado en la cantidad de gases de falla liberados por el aceite aislante cuando ocurre una falla que a su vez aumenta la temperatura en el transformador. La presencia de los gases de falla depende de la temperatura o energía que romperá el enlace o relación de la estructura química del aceite aislante. Este método utiliza el gas individual en lugar del cálculo de gas ratios para detectar fallas [11].

**Duval triangle method.** Se utilizan tres gases que están relacionados con el incremento de energía o temperatura de las fallas: metano cuando se opera a temperaturas bajas, etileno cuando se opera a temperaturas altas y acetileno cuando se opera a temperaturas muy altas las cuales generan arcos. El triángulo está constituido por los porcentajes relativos de los gases mencionados. Con este método es posible identificar 6 tipos de fallas básicas. La gran ventaja de este método, es que siempre va a proponer la identificación de una falla con un

error de diagnóstico muy bajo, sin embargo, se recomienda solo para identificar una falla cuando tenemos algún otro diagnóstico que indique que existe alguna avería [12].

La evaluación de las concentraciones de gases disueltos individuales del aceite es utilizada para evaluar el tipo de falla. En los métodos DGA, las concentraciones de los cinco principales gases hidrocarbonados [Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) y acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ )] han sido utilizados para identificar y caracterizar el tipo de falla como: operación normal (cuando no hay falla), descargas parciales (nivel bajo y alto), descargas por arco (nivel bajo y alto) y fallas térmicas (nivel bajo, medio y alto) [13].

Las fallas por descargas parciales se miran como pulsos cortos que van de la mano con emisión de sonido, respuestas brillantes, térmicas y químicas, las bases de las descargas parciales comprenden vacíos y grietas en el aislamiento sólido y mecanismo flotantes. Por lo general, este tipo de falla es clasificada por la producción de  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Las fallas por descargas por arco generan altas temperaturas y grandes cantidades de gases principalmente  $\text{C}_2\text{H}_2$  y  $\text{H}_2$ . Estas fallas son muy peligrosas, si no se atienden puede causar explosiones peligrosas. Las fallas térmicas surgen debido al calor de los conductores, corto circuitos, calor de los



devanados y refrigeración inadecuada. A temperatura baja (<300 °C) se produce CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> y algo de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, sin embargo a temperaturas altas (>300 °C) se produce C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, las temperaturas altas favorecen la producción de etileno [14].

La sumatoria de todas las concentraciones de los gases antes mencionados más el monóxido de carbono (CO) corresponde a los gases totales disueltos de combustión (TDCG) [15].

La tasa de cambio es expresada en partes por millón, por volumen, de gases combustibles generados por día o por mes. La sumatoria de estos gases en µL/L es expresada como TDCG, en µL/L por volumen. La teoría termodinámica, muestra que la aparición de los diferentes gases disueltos en el aceite mineral aislante, requieren diferentes energías de formación [16].

El objetivo de este artículo es realizar el estudio del estado de 24 transformadores inmersos en aceite mineral aislante posterior a mantenimiento, comparando los niveles de severidad de las fallas obtenidas dependiendo exclusivamente del DGA a partir de los valores mostrados en la Tabla 2 conforme a la Guía Std C57-04-2008 y al método de calificación NEI propuesto por Jakob y Dukarm en 2015.

Los transformadores utilizados para este trabajo son de distintas marcas, operan en un rango de temperatura de 40°C-65°C y fueron sometidos a distintas condiciones de trabajo, como exposición a diversos fenómenos en la intemperie, distinto tiempos de servicio y eventos que pudieron provocar una elevación de temperatura de trabajo como descargas y sobrecargas eléctricas. Asimismo, es preciso mencionar que los transformadores en estudio pertenecen a distintas regiones de México.

En la Tabla 3 se muestran las características de cada transformador.

**Tabla 3.** Datos del equipo

| Transformador | Capacidad (kVA) | Tensión en alta (V) | Tensión en baja (V) |
|---------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 1             | 750             | 23000               | 480-277             |
| 2             | 750             | 23000               | 220-127             |
| 3             | 750             | 4160                | 440-254             |
| 4             | 750             | 4160                | 220-127             |
| 5             | 750             | 4160                | 480-277             |
| 6             | 750             | 4160                | 480-277             |
| 7             | 750             | 4160                | 440-254             |
| 8             | 2500            | 23000               | 4160-2401           |
| 9             | 4000            | 23000               | 4160                |
| 10            | 1500            | 23000               | 220-127             |
| 11            | 2000            | 23000               | 4160-2401           |
| 12            | 1000            | 4160                | 220-127             |
| 13            | 23000           | 4160                | 2255                |
| 14            | 150             | 480                 | 220-127             |
| 15            | 500             | 4160                | 480-277             |
| 16            | 4000            | 23000               | 4160                |
| 17            | 1200            | 4160                | 480-277             |
| 18            | 400             | 23000               | 220-127             |
| 19            | 1000            | 4160                | 480-277             |
| 20            | 500             | 4160                | 230-133             |
| 21            | 500             | 4160                | 480-277             |
| 22            | 1000            | 23000               | 220-127             |
| 23            | 2500            | 23000               | 440                 |
| 24            | 2500            | 23000               | 440                 |

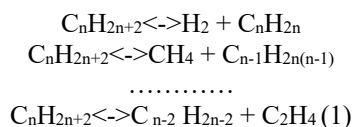
### 1.1 *Descomposición térmica del aceite*

El aceite aislante utilizado en los transformadores de potencia es una combinación de aceite de transformador líquido y celulosa sólida impregnada. El aislamiento deteriorado y



el envejecimiento son las dos principales causas de fallas incipientes. Las principales causas de envejecimiento y deterioro del aislamiento son tensiones térmicas, tensiones eléctricas, tensiones mecánicas y humedad [17].

El aceite mineral contiene tres principales productos hidrocarbonados (alcanos, cicloalcanos y aromáticos) donde los alcanos son térmicamente inestables descomponiéndose en hidrógeno y en otros alcanos y alquenos, como se observa a continuación:



Los alcanos se descomponen a temperaturas más bajas a medida que aumenta el número de carbono en las moléculas. En el equilibrio y a temperaturas de 300°C los alcanos se descomponen en hidrocarburos ligeros con un número de carbonos inferior a 4. Los alquenos son térmicamente más estables que los alcanos y los ciclo alcanos se descomponen en alquenos por la abertura de los anillos de carbono [18].

### 1.2 Teoría termodinámica del aceite mineral

La severidad de las fallas en transformadores basada en la teoría termodinámica, es la energía requerida para liberar los gases disueltos del aceite crudo, esta energía es cuantificada mediante la entalpía de reacción ( $\Delta H^\circ_f$ ) [15]:

$$\Delta H^\circ_f = \Delta H^\circ_{\text{productos}} - \Delta H^\circ_{\text{reactivos}} \quad (2)$$

Dónde:

$\Delta H^\circ_f$  es la entalpía de formación.

$\Delta H^\circ_{\text{productos}}$  es la entalpía de los productos.  $\Delta H^\circ_{\text{reactivos}}$  es la entalpía de los reactivos.

Para las reacciones endotérmicas como la pirólisis de los hidrocarburos, existe una

correlación entre el cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) y la energía asociada a la reacción, resaltando que la severidad de las fallas causa una rápida descomposición de los productos. Proponiendo el *n*-octano ( $C_8H_{18}$ ) como el primer hidrocarburo resultante del proceso de descomposición [16].

En la Tabla 4 se muestran las reacciones de descomposición para obtener los gases disueltos en el aceite mineral a partir de *n*-octano, así como la energía requerida para su formación.

**Tabla 4.** Entalpías de formación de los hidrocarburos a partir de *n*-octano

| Reacción de descomposición                              | $\Delta H^\circ_f$ (kJ/mol) |
|---|-----------------------------|
| $C_8H_{18(l)} \leftrightarrow CH_4(g) + C_7H_{14(l)}$   | 77.7                        |
| $C_8H_{18(l)} \leftrightarrow C_2H_6(g) + C_6H_{12(l)}$ | 93.5                        |
| $C_8H_{18(l)} \leftrightarrow C_2H_4(g) + C_6H_{14(l)}$ | 104.1                       |
| $C_8H_{18(l)} \leftrightarrow H_2(g) + C_8H_{16(l)}$    | 128.5                       |
| $C_8H_{18(l)} \leftrightarrow C_2H_2(g) + C_6H_{16(l)}$ | 278.3                       |

### 1.3 Determinación de la severidad de la falla mediante el NEI

Jakob y Dukarm en 2015 proponen obtener la evaluación del NEI de los hidrocarburos a partir de los productos de la entalpía de formación de  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  y la concentración de cada uno de ellos en el aceite como se observa en la siguiente ecuación:

$$NEI = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta H^\circ_{f_i} \cdot C_i}{22,400} \quad (3)$$

Dónde:

$C_i$  corresponde a la concentración de cada gas en ppm y  $\Delta H^\circ_{f_i}$  corresponde a la entalpía de formación de cada hidrocarburo en kJ/mol.

Es importante considerar que, si la concentración del gas es reportada a una temperatura diferente de 273K es necesario multiplicar la ecuación (3)



por un factor de corrección como sigue a continuación:

Factor de corrección (FC):

$$FC = \frac{273}{(273+T)} \quad (4)$$

Donde, T (K) es la temperatura reportada de la concentración de los gases.

Jakob y Dukarm en 2015, también consideran que a partir de estudios de correlación del estado de los transformadores y la relación oxígeno/aire, el mayor efecto corresponde a la relación N<sub>2</sub> vs O<sub>2</sub> asociando así, que los transformadores con mayor contenido de oxígeno en el aceite tienden a tener concentraciones más bajas de gases combustibles disueltos.

Asimismo, se asigna el nivel de la condición de cada muestra de aceite mediante las siguientes relaciones expresadas en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Relaciones para asignar condición al transformador

| Relación              | Condición                     |
|-----------------------|-------------------------------|
| Si $x \geq L_3$       | 4                             |
| Si $L_2 \leq x < L_3$ | $3 + (x - L_2) / (L_3 - L_2)$ |
| Si $L_1 \leq x < L_2$ | $2 + (x - L_1) / (L_2 - L_1)$ |
| Si $x < L_1$          | $1 + x / L_1$                 |

Donde x es el NEI calculado de cada muestra de aceite mediante la ecuación (3) y L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> y L<sub>3</sub> corresponden a los percentiles 80, 90 y 95 de una base de datos con los DGA de diversos transformadores [19].

## 2. Método

Se realiza el estudio de los reportes de contenido de DGA de un grupo de 24 transformadores después de mantenimiento. Se toma una muestra

de aceite mineral aislante del transformador siguiendo el procedimiento indicado en la NMX-J-123-ANCE-2019 [20], en el cual se extrae una alícuota de 1 a 2 L de aceite de la boquilla inferior del transformador mediante una jeringa de vidrio, evitando la formación de burbujas y contaminación de algún agente externo.

Posteriormente la muestra es llevada al laboratorio donde se realiza la cuantificación de los contaminantes mediante un ensayo de cromatografía de gases siguiendo el método de prueba NMX-J-308-ANCE-2004 APÉNDICE A, ASTM D 3612-02 [21] utilizando un cromatógrafo de gases PERKIN ELMER AUTO SYSTEM XL, donde se conoce la concentración (ppm) de hidrógeno, metano, etano, etileno, acetileno, monóxido de carbono, nitrógeno y oxígeno.

### 2.3 Determinación de severidad de falla dependiendo exclusivamente del DGA

Al conocer la concentración de cada gas para los 24 transformadores, se obtiene la cantidad de TGCD de cada muestra mediante la sumatoria de las concentraciones de hidrógeno (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO), los resultados se comparan con los límites máximos presentados en la Tabla 2 y se interpretan mediante la Tabla 1 asignando la severidad de la falla según la Guía IEEE Std C57.104-2008.

### 2.4 Determinación de la falla por medio del NEI

Una vez conocida la concentración de los gases, se calculan las relaciones de N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> de cada muestra, como lo proponen Jakob y Dukarm en 2015. A partir de la mediana de la concentración de N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> de las 24 muestras, los datos se clasifican en dos grupos, “Niveles altos de N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>” y “Niveles bajos de N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>”. Si la





concentración de oxígeno es baja, la relación  $N_2/O_2$  es alta, asignando como nivel alto a los que están por debajo de la mediana y niveles bajos a los que se encuentran por encima de ella.

Se calculan las entalpías de formación de los hidrocarburos, como se indica en la ecuación 2. Posteriormente, se realiza la evaluación del NEI mediante las ecuaciones (3) y (4).

Una vez calculado el NEI (x), se obtiene el nivel de severidad de falla del transformador de acuerdo con las relaciones expresadas en la Tabla 5, donde  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  corresponden a los percentiles 80, 90 y 95 de una base de datos con los análisis de gases disueltos de 100 transformadores que han recibido mantenimiento en los últimos 5 años. Finalmente, se asigna la severidad de la falla de cada muestra de aceite a partir de la Tabla 1.

### 3. Resultados

En la Figura 1 se observa el comportamiento de los transformadores mediante los incrementos de cada gas combustible (metano, etano, etileno y acetileno), hidrógeno y monóxido de carbono.

En el eje de la abscisa se observan los 24 transformadores en estudio y en la ordenada la concentración de cada uno de los gases para cada muestra.

Para el caso del acetileno se observa que los transformadores 6, 7, 8 y 24 se encuentran en la condición 2 con concentraciones en el rango de 2-9 ppm, mientras que los transformadores [1-5] y [9-23] se encuentran en la condición 1 con menos de 1 ppm. Para etileno, los transformadores 6, 7, 8 y 24 presentan elevación en su concentración, donde el 6,7 y 8 están en la condición 2 en el rango de 51-100 ppm, mientras que el 24 se encuentra en la condición 3 en el rango de 101-200 ppm.

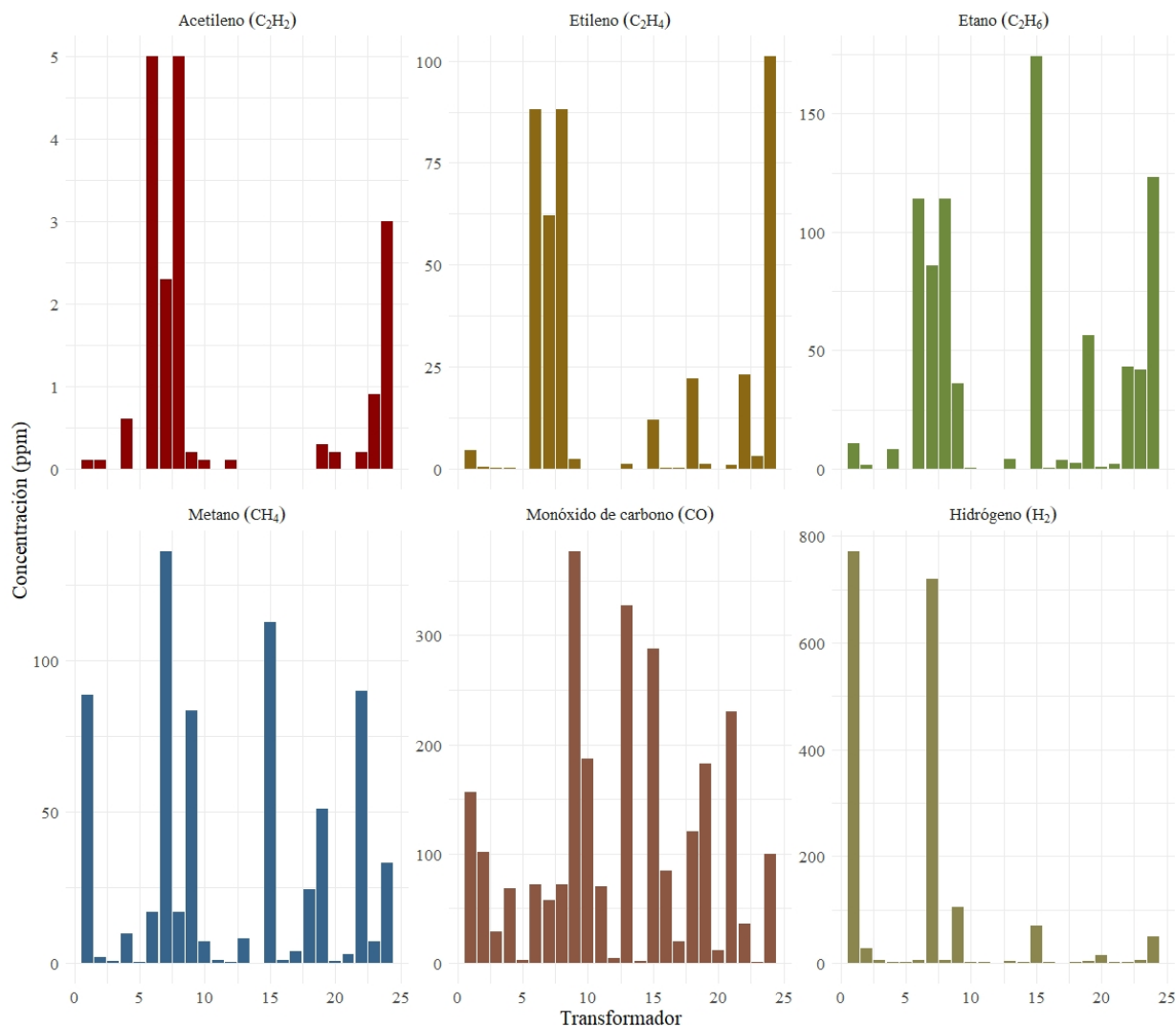


Figura 1. Gases disueltos en las muestras de aceite mineral aislante de los transformadores

Los transformadores [1-5] y [9-23] se encuentran en la condición 1 con concentraciones menores a 50 ppm. En caso del etano, se observa que el transformador 7 se ubica en la condición 2 en el rango de 66-100 ppm, el 6, 8 y 24 se encuentran en la condición 3 en el rango de 101-150 ppm, de igual manera, se observa un incremento significativo en el transformador 15 con concentración mayor a 150 ppm, ubicándose en la condición 4. Los transformadores [1-5], [9-14]

y [16-23] están en la condición 1 con menos de 65 ppm. Se observa que, para el metano, los transformadores 7 y 15 presentan concentraciones entre 121-400 ppm lo que los ubica en la condición 2 y los transformadores [1-6], [8-14] y [16-24] se ubican en la condición 1 con concentraciones menores a 1 ppm.

Como se mencionó anteriormente, las concentraciones de hidrógeno y monóxido de



carbono se originan por las reacciones químicas internas normales del transformador y la descomposición de la celulosa, por lo que para este trabajo no son relevantes.

### 3.1 Nivel de severidad de falla dependiendo exclusivamente del DGA

A partir de la Figura 1, se determina la falla mediante las Tabla 1 y Tabla 2, identificando los límites en los que se encuentra la concentración de metano, etano, etileno y acetileno de cada transformador.

En la Tabla 6 se observa que, de los 24 transformadores, el 1 y 7 se clasifican en la condición 2 con concentración de TGCD menor a 720 ppm, mientras que los transformadores restantes se encuentran en la condición 1.

De acuerdo con la Guía IEEE Std C57.104-2008, el total de gases combustibles disueltos (TGCD), para la condición 1 “El transformador opera satisfactoriamente”, debe ser menor a 720 ppm, mientras que, para la condición 2 “Niveles más altos de lo normal” corresponde a 721-1920 ppm.

Ningún transformador está asignado a las condiciones más severas 3 y 4, sin embargo, realizando un análisis DGA como se observa en la Figura 1, se visualiza que, aunque estos transformadores no tienen aparente riesgo, si presentan elevación de gases individuales (metano, etano, etileno y acetileno) que, en un tiempo corto de operación, podría resultar en alguna falla mayor.

Tabla 6. Nivel de la severidad de la falla según la interpretación del DGA

| Transformador | TGCD (ppm) | Condición |
|---------------|------------|-----------|
| 1             | 1032.27    | 2         |
| 2             | 134.31     | 1         |
| 3             | 35.04      | 1         |
| 4             | 89.17      | 1         |
| 5             | 4.43       | 1         |
| 6             | 302        | 1         |
| 7             | 1063.7     | 2         |
| 8             | 302        | 1         |
| 9             | 604.3      | 1         |
| 10            | 195.8      | 1         |
| 11            | 73         | 1         |
| 12            | 5.5        | 1         |
| 13            | 344.1      | 1         |
| 14            | 3.1        | 1         |
| 15            | 655.7      | 1         |
| 16            | 87.5       | 1         |
| 17            | 27.44      | 1         |
| 18            | 170.7      | 1         |
| 19            | 294        | 1         |
| 20            | 28.5       | 1         |
| 21            | 237.8      | 1         |
| 22            | 194.2      | 1         |
| 23            | 59.9       | 1         |
| 24            | 410        | 1         |

### 3.1 Nivel de severidad de falla mediante el NEI

En la Tabla 7 se observa la relación  $N_2/O_2$  de cada transformador obtenida a partir de los datos de la cromatografía de gases observados en la Figura 1.



Tabla 7. Relación  $N_2/O_2$

| Transformador | Relación $N_2/O_2$ | Concentración de oxígeno |
|---------------|--------------------|--------------------------|
| 1             | 6.1274             | Bajo                     |
| 2             | 4.2806             | Alto                     |
| 3             | 3.8608             | Alto                     |
| 4             | 4.6752             | Bajo                     |
| 5             | 3.6652             | Alto                     |
| 6             | 7.4071             | Bajo                     |
| 7             | 4.5223             | Bajo                     |
| 8             | 7.4071             | Bajo                     |
| 9             | 27.8199            | Bajo                     |
| 10            | 4.0105             | Alto                     |
| 11            | 3.5571             | Alto                     |
| 12            | 3.7679             | Alto                     |
| 13            | 0.0698             | Alto                     |
| 14            | 3.4127             | Alto                     |
| 15            | 9.5917             | Bajo                     |
| 16            | 3.9097             | Alto                     |
| 17            | 3.9329             | Alto                     |
| 18            | 3.7128             | Alto                     |
| 19            | 17.6425            | Bajo                     |
| 20            | 3.9233             | Alto                     |
| 21            | 7.4887             | Bajo                     |
| 22            | 9.5055             | Bajo                     |
| 23            | 22.2930            | Bajo                     |
| 24            | 26.7418            | Bajo                     |

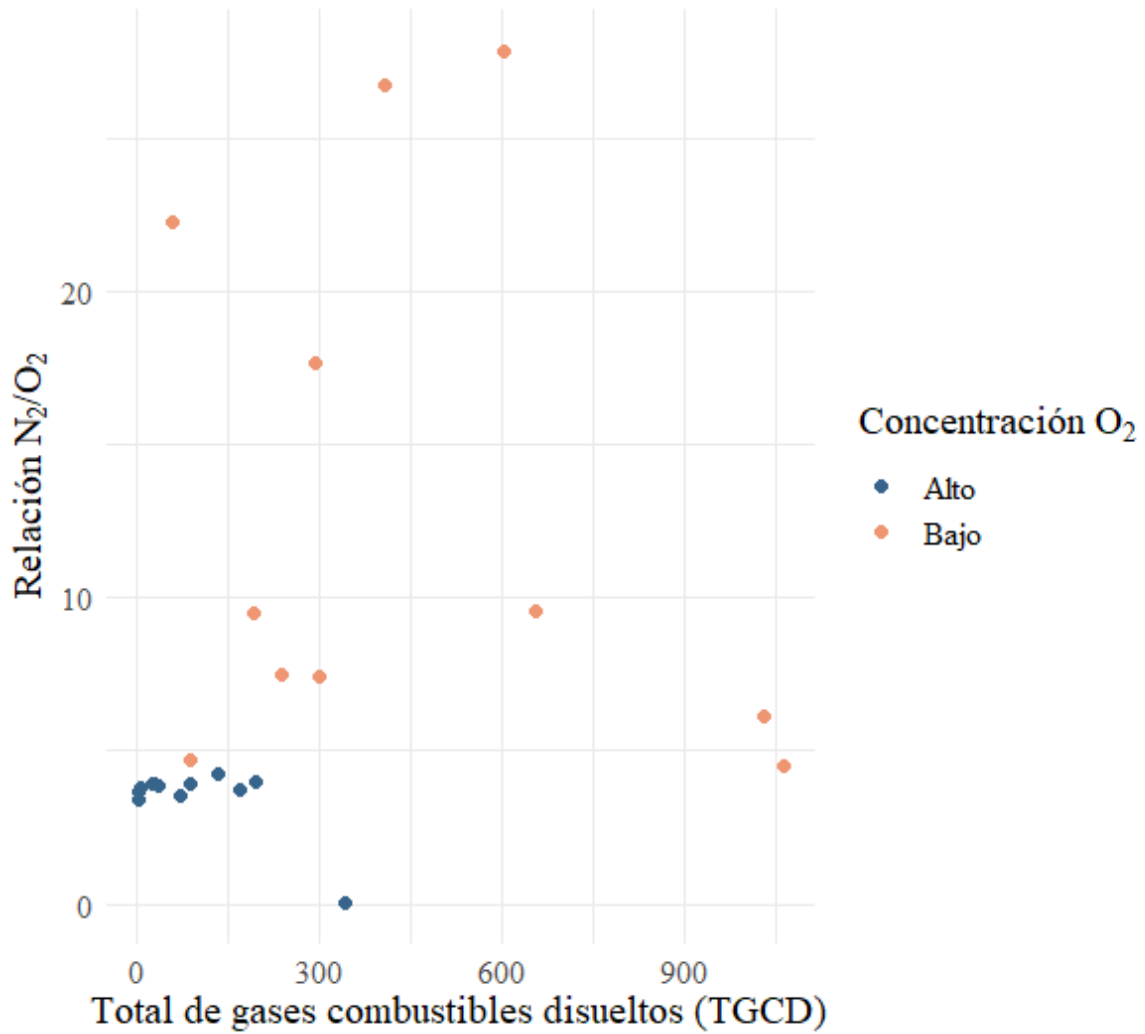
Asimismo, se visualiza que los transformadores marcados en naranja tienen concentraciones bajas de oxígeno disuelto incrementando gradualmente las concentraciones de TGCD lo que promueve la degradación del aceite mineral. Los transformadores 1, 4, [6-9], 15,19 y [21-24], de acuerdo con la interpretación del DGA se encuentran en las condiciones 1 y 2, sin embargo, en la Figura 1 se detectan aumentos en gases individuales y niveles bajos de oxígeno disuelto.

Los transformadores marcados en azul contienen concentraciones altas de oxígeno disuelto y estos tienden a tener concentraciones muy bajas de TGCD menores a 720 ppm, lo que indica que aparentemente los transformadores funcionan adecuadamente, para este caso se consideran los transformadores 2, 3, 5, [10-14], [16-18] y 20.

De acuerdo con lo descrito anteriormente en el apartado 3.2, es posible determinar que hay una estrecha relación entre la relación  $N_2/O_2$ , los valores altos y bajos de oxígeno disuelto y la concentración de TGCD. A partir de la ecuación 2 se calculan las entalpías de formación de los gases combustibles, así como se expresan en la Tabla 4.

La mediana de los datos obtenidos corresponde a 4.4014, por lo tanto, los transformadores con relación  $N_2/O_2$  mayor a este valor, tienen niveles bajos de oxígeno, por el contrario, los transformadores con relación  $N_2/O_2$  menor a la mediana, tienen niveles altos de oxígeno.

En la Figura 2 se observa la gráfica que relaciona el total de gases combustibles disueltos con la relación  $N_2/O_2$  para concentraciones bajas y altas de oxígeno.

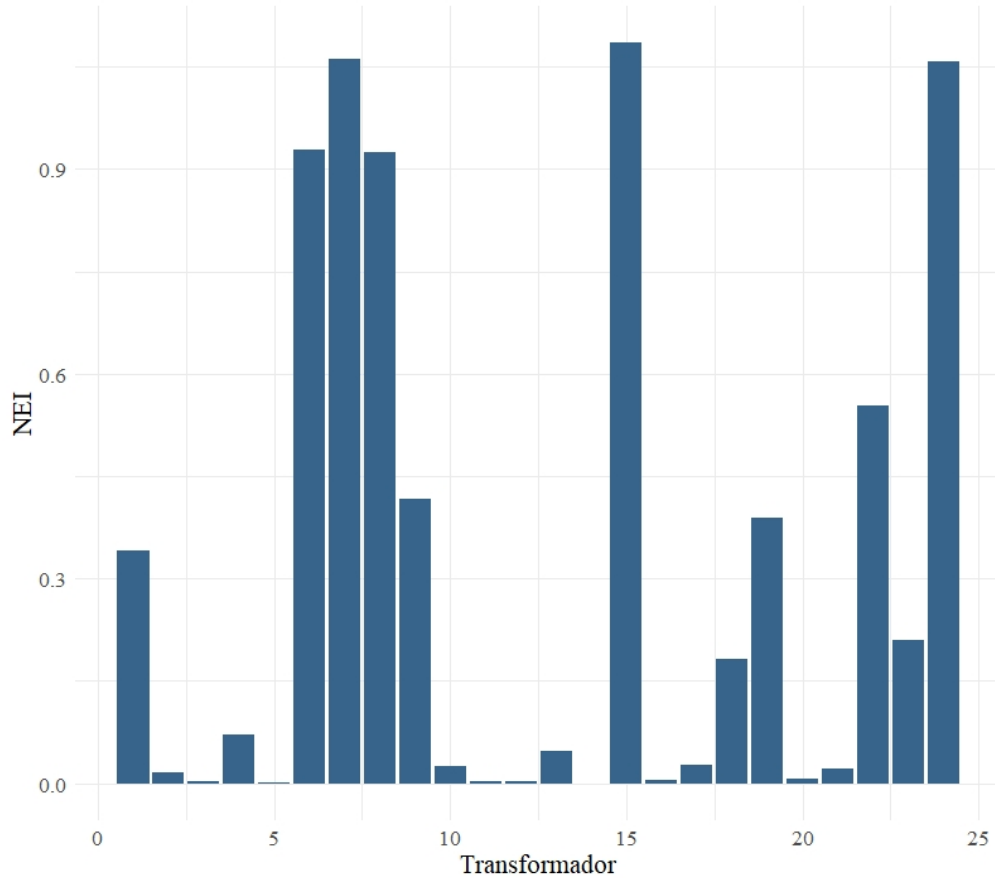


Una vez obtenidos todos los datos necesarios, se calcula el NEI para cada transformador mediante las ecuaciones 3 y 4.

En la Figura 3, se presenta el NEI para cada uno de los 24 transformadores.



Figura 3. NEI de cada muestra para los transformadores.



A partir de la Figura 3 se observa que la intensidad energética normalizada en los transformadores 6, 7, 8, 15, 22 y 24 es mayor que la de los transformadores [1-5], [9-14], [16-21] y 23.

La Tabla 8 se realizó con base a los estudios de Jakob y Dukarm en 2015, sin embargo los datos estimados corresponden a los percentiles de una base de datos de 100 transformadores que han recibido mantenimiento en la empresa Alfa

Bobinados Industriales S.A. de C.V. y con ello se determina la severidad de la falla de cada transformador mediante las relaciones de la Tabla 5 como se muestra a continuación.

Tabla 8. Límites DGA NEI (kJ/KI) basados en los percentiles 80, 90 y 95 de 100 transformadores.

| Grupo                     | L <sub>1</sub> | L <sub>2</sub> | L <sub>3</sub> |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Nivel alto O <sub>2</sub> | 0.18           | 0.42           | 0.68           |
| Nivel bajo O <sub>2</sub> | 0.60           | 0.98           | 1.46           |

Base de datos Alfa Bobinados Industriales S.A. de C.V.

En la Tabla 9 se muestra la determinación de la severidad de la falla mediante el cálculo del NEI, donde se observa la severidad de las fallas de los transformadores.



Tabla 9. NEI calculado

| Transformador | Condición |
|---------------|-----------|
| 1             | 1         |
| 2             | 1         |
| 3             | 1         |
| 4             | 1         |
| 5             | 1         |
| 6             | 2         |
| 7             | 3         |
| 8             | 2         |
| 9             | 1         |
| 10            | 1         |
| 11            | 1         |
| 13            | 1         |
| 14            | 1         |
| 15            | 3         |
| 16            | 1         |
| 17            | 1         |
| 18            | 2         |
| 19            | 1         |
| 20            | 1         |
| 21            | 1         |
| 22            | 2         |
| 23            | 1         |
| 24            | 3         |

A partir de la clasificación y del cálculo del NEI, se obtiene que, 17 transformadores operan en condiciones satisfactorias. Los transformadores 6, 8, 18 y 22 se encuentran en la condición 2 “Niveles más altos de lo normal” y los transformadores 7, 15 y 24 se clasifican en la condición 3 “Altos niveles de descomposición”, lo que concuerda con la Figura 1, donde se observa que a pesar de tener concentraciones de TGCD debajo de 720 ppm (Condición 1) y 721-1920 ppm (Condición 2) se presentan elevaciones considerables de gases individuales, sobre todo de acetileno lo que implica una

degradación considerable del aceite mineral aislante.

Los transformadores [1-5], [9-14], 16, 17 y [19-23] se encuentran en la condición 1, pues su intensidad energética normalizada es menor a los valores  $L_1$ .

Finalmente se observa que hay una diferencia notable en la severidad de la falla determinada mediante la interpretación del TGCD y el NEI como sigue en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparativo de clasificación de condición mediante la interpretación del DGA y el NEI.

| Condición                       | Interpretación simple del DGA | NEI |
|---------------------------------|-------------------------------|-----|
| 1                               | 22                            | 17  |
| 2                               | 2                             | 4   |
| 3                               | 0                             | 3   |
| 4                               | 0                             | 0   |
| <b>Total de transformadores</b> | 24                            | 24  |

#### 4 Conclusiones

La detección temprana de fallas incipientes en los transformadores es indispensable en la industria ya que evita daños severos en los equipos, accidentes y afectaciones económicas. Es complicado asignar la falla real basándose en un solo tipo de análisis interpretativo, pues los resultados finales no son concluyentes. En este trabajo, se observa que a partir del estudio comparativo para la detección de fallas por medio de las técnicas de interpretación del DGA y NEI, la condición de la severidad de las fallas presenta cambios notables.

En concordancia con los autores Jakob y Dukarm en 2015, la técnica interpretativa por medio del NEI presenta una mejor sensibilidad a los análisis DGA.



Incorporar las energías de formación de los productos a partir de la descomposición de n-octano, permite determinar resultados aproximados a las condiciones reales y, por ende, facilita la cuantificación de la severidad de la falla, esto resulta necesario y muy útil en la práctica para implementar la técnica de mantenimiento adecuada a cada transformador.

Con el fin de tener un diagnóstico más preciso del estado de los transformadores, se recomienda que, al realizar análisis de gases disueltos en aceite mineral aislante, se consideren varias técnicas interpretativas incluyendo el cálculo de NEI, para así lograr una mejor interpretación de la severidad de fallas incipientes en los transformadores.

## 5 Agradecimientos

A la empresa Alfa Bobinados Industriales S.A. de C.V. por el apoyo y facilitación de muestras y pruebas. Al M. en F. Luis Octavio Gaytán Vallejo por la aportación de datos relevantes para este trabajo.

## 6 Reconocimiento de autoría

*Bethsaida Adriana Gutiérrez Chávez:* Conceptualización, Ideas, Escritura y Borrador original; Administración del proyecto. *Georgina Montes de Oca-Ramírez:* Metodología, Investigación, Análisis formal; Escritura: revisión y edición.

## Referencias

[1] Zeng, B., Guo, J., Zhang, F., Zhu, W., Xiao, Z., Huang, S. y Fan, P. (2020). Prediction Model for Dissolved Gas Concentration in Transformer Oil Based on Modified Grey Wolf Optimizer and LSSVM with Grey Relational Analysis and Empirical Mode Decomposition. *Energies*, 13(2), 422. <https://doi.org/10.3390/en13020422>

[2] K. Reddy, "Latest Trends In Use Of Transformer Oils", *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 67, n.º 7, pp. 37-39, julio de 2019. Accedido el 20 de agosto de 2021. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v67i7p207>

[3] M. Wang, A. J. Vandermaar y K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, n.º 6, pp. 12–25, noviembre de 2002. Accedido el 20 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1109/mei.2002.1161455>

[4] N. K. Dhote y J. B. Helonde, "Improvement in Transformer Diagnosis by DGA using Fuzzy Logic", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 9, n.º 2, pp. 615–621, marzo de 2014. Accedido el 20 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.5370/jeeet.2014.9.2.615>

[5] A. Abu-Siada y S. Islam, "A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, n.º 2, pp. 849-857, abril de 2012. Accedido el 20 de agosto de 2021. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2180932>

[6] Cruz, V. G. M., Costa, A. L. H. y Paredes, M. L. L. (2015). SIMULATION OF THERMAL DECOMPOSITION OF MINERAL INSULATING OIL. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(3), 781-794. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150323s00003531>

[7] "Guide for the sampling of gases and of oil-filled electrical equipment and for analysis of free and dissolved gases". IEC Standard 60567, 2005.

[8] ASTM D3612-02(2017), Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)

[9] Mharakurwa, E. T., Nyakoe, G. N. y Akumu, A. O. (2019). Power Transformer Fault Severity Estimation Based on Dissolved Gas Analysis and Energy of Fault Formation Technique. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2019/9674054>

[10] "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers," in IEEE Std C57.104-





## Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 4 (3): 208-223

2008 (Revision of IEEE Std C57.104-1991), vol., no., pp.1-36, 2 Feb. 2009, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.4776518>

[11] Londo, Leonidha & Celo, Marialis & Bualoti, Rajmonda. (2015). Assessment of Transformer Condition using the Improve Key Gas Methods. International Journal of Engineering Research & Technology. 4. 48-55. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV4IS050158>

[12] "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers," in IEEE Std C57.104-2019 (Revision of IEEE Std C57.104-2008), vol., no., pp.1-98, 1 Nov. 2019, <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8890040>

[13] Ghoneim, S. S. M. y Taha, I. B. M. (2016). A new approach of DGA interpretation technique for transformer fault diagnosis. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 81, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.02.018>

[14] S. A. Ward et al., "Towards Precise Interpretation of Oil Transformers via Novel Combined Techniques Based on DGA and Partial Discharge Sensors", Sensors, vol. 21, n.º 6, p. 2223, marzo de 2021. Accedido el 20 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/s21062223>

[15] Ghoneim, S. S. M. (2018). Intelligent prediction of transformer faults and severities based on dissolved gas analysis integrated with thermodynamics theory. IET Science, Measurement & Technology, 12(3), 388-394. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0450>

[16] Jakob, F., Noble, P. y Dukarm, J. J. (2012). A Thermodynamic Approach to Evaluation of the Severity of

Transformer Faults. IEEE Transactions on Power Delivery, 27(2), 554-559. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2011.2175950>

[17] Sun, H.-C., Huang, Y.-C. y Huang, C.- M. (2012). A Review of Dissolved Gas Analysis in Power Transformers. Energy Procedia, 14, 1220-1225. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1079>

[18] Shirai, M., Shimoji, S. y Ishii, T. (1977). Thermodynamic Study on the Thermal Decomposition of Insulating Oil. IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-12(4), 272-280. <https://doi.org/10.1109/tei.1977.297979>

[19] Jakob, F. y Dukarm, J. J. (2015). Thermodynamic Estimation of Transformer Fault Severity. IEEE Transactions on Power Delivery, 30(4), 1941-1948. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2015.2415767>

[20] NMX-J-123-ANCE-2019 Aceites minerales aislantes para transformadores-Especificaciones, muestreo y métodos de prueba, declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero del 2020. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5584611&fecha=23/01/2020](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5584611&fecha=23/01/2020)

[21] NMX-J-308/1-ANCE-2004 Transformadores-guía para el manejo, almacenamiento, control y tratamiento de aceites minerales aislantes para transformadores en servicio, declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de agosto del 2004. <https://www.dof.gob.mx>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Propiedades mecánicas de $\beta$ -MnO<sub>2</sub> por DFT

## *Mechanical properties of $\beta$ -MnO<sub>2</sub> by DFT*

María Alejandra Gómez Murillo<sup>ID</sup>, Balter Trujillo Navarrete\*<sup>ID</sup>

Tecnológico Nacional de México/IT de Tijuana/ Tecnológico de Tijuana, Blvd. Alberto Limón Padilla s/n Col.  
Otay Tecnológico, Tijuana, B.C. 22510, México.

**Autor de correspondencia:** Balter Trujillo Navarrete, Centro de Graduados e Investigación en Química. E-mail: [balter.trujillo@tectijuana.mx](mailto:balter.trujillo@tectijuana.mx). ORCID: [0000-0002-0196-1001](https://orcid.org/0000-0002-0196-1001).

**Recibido:** 2 de Junio del 2021

**Aceptado:** 21 de Septiembre del 2021

**Publicado:** 30 de Septiembre del 2021

**Resumen.** - *Se sintetizaron nanovarillas de óxido de manganeso en fase cristalina beta ( $\beta$ -MnO<sub>2</sub>). Microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos-X (XRD) confirmaron la morfología y fase cristalina, respectivamente. Mediante la teoría del funcional de densidad (DFT), se calcularon las propiedades mecánicas teóricas de  $\beta$ -MnO<sub>2</sub> con el programa CASTEP. Se realizó una optimización de la geometría de la celda unitaria, determinándose las constantes elásticas  $C_{ij}$ , calculándose los valores del módulo de Young y de corte, y el coeficiente de Poisson, entre otros. Los resultados fueron comparados con los valores reportados en la literatura, encontrándose una significativa similitud en los parámetros analizados. Las relaciones de  $C_{ij}$  indicaron la aceptación de los criterios de Born, confirmando la estabilidad de la estructura cristalina de  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>. La constante  $C_{44}$ , así como el módulo de volumen y de corte, mostraron valores grandes, lo que indica un material con considerable dureza. Este comportamiento fue confirmado con el valor obtenido de la razón del módulo de volumen entre el módulo de corte por la aproximación de Hill. El entendimiento de las propiedades calculadas en este estudio usando CASTEP permitirá obtener parámetros adicionales de propiedades ópticas, termodinámicas, entre otras, así como el desarrollo de modelaciones y simulaciones que permitan entender y aplicar los conocimientos adquiridos a aplicaciones reales (experimentales), p. ej., en la remoción de contaminantes.*

**Palabras clave:** DFT; CASTEP; MnO<sub>2</sub>; Propiedades mecánicas; Constantes elásticas.

**Abstract.** - *Beta manganese oxide nanorods ( $\beta$ -MnO<sub>2</sub>) were synthesized by the hydrothermal method. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) confirmed the shape and crystalline phase, respectively. The theoretical mechanical properties were calculated by the density functional theory (DFT) using the CASTEP program. The optimization geometry of the unit cell was done, determining the elastic constants  $C_{ij}$ , calculating the values of Young's modulus and shear, and the Poisson's ratio, among others. The results were compared with the values reported in the literature, finding a significant similarity among the parameters analyzed. The  $C_{ij}$  relations indicated the acceptance of the Born criterion's, confirming the stability of the crystal structure of  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>. The constant  $C_{44}$  and the volume and shear modulus showed large values, indicating a material with considerable hardness. This behavior was confirmed with the value obtained from the ratio of the volume modulus between the shear modulus by the Hill approximation. The understanding of the properties calculated in this study using CASTEP will allow obtaining additional parameters of optical and thermodynamic properties, among others, as well as the development of models and simulations that allow understanding and applying the acquired knowledge to real applications (experimental), e.g., in the removal of contaminants.*

**Keywords:** DFT; CASTEP; MnO<sub>2</sub>; Mechanical properties; Elastic constants.



## 1. Introducción

Actualmente, se conocen seis óxidos estequiométricos del manganeso dentro de los cuales se encuentra el óxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ). [1] En esta proporción atómica, el  $\text{MnO}_2$  puede asumir seis fases cristalinas, como lo son  $\alpha\text{-MnO}_2$ ,  $\beta\text{-MnO}_2$ ,  $\gamma\text{-MnO}_2$ ,  $\delta\text{-MnO}_2$ ,  $\eta\text{-MnO}_2$ ,  $\varepsilon\text{-MnO}_2$ . [2] El polimorfo  $\beta\text{-MnO}_2$  destaca entre los demás por su desempeño catalítico mejorado y alta selectividad, el cual es fácil de sintetizar, purificar, y con bajo costo de producción. [3]

Comúnmente,  $\beta\text{-MnO}_2$  es sintetizado a partir de la reducción de permanganato ( $\text{Mn(VII)}$ ) [1] vía hidrotermal. Sin embargo, existen diversos métodos reportados y reproducidos en la literatura, con lo que es posible la obtención de nanoestructuras, p. ej., cables, tubos, flores, esferas, mesoporosas, estrellas y varillas. [4] [5] Esta última forma es de gran interés por sus propiedades fisicoquímicas, antiincrustantes y mecánicas. [6]

En las últimas décadas, el uso de  $\beta\text{-MnO}_2$  ha ido en aumento en diversas aplicaciones, p. ej., supercapacitores, [7] baterías de pila seca (p. ej., alcalinas), sensores de gas, [8] fotodetección y catálisis. [5] Conjuntamente, las propiedades fisicoquímicas se han estudiado mediante técnicas de caracterización, p. ej., microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía Raman, espectroscopía infrarroja (IR), espectroscopía de UV-VIS reflectancia difusa (DR-UV-VIS), difracción de rayos-X (XRD), y espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Recientemente, el uso de la teoría del funcional de densidad (DFT) para el modelado molecular ha representado una alternativa para realizar estimaciones de propiedades fisicoquímicas que

no son posibles mediante la ecuación de Schrödinger debido a su complejidad, ayudando a describir el comportamiento cuántico de átomos y moléculas.

A pesar de que los inicios de DFT datan desde hace décadas, la ejecución de la técnica ha mejorado mediante el uso de ecuaciones de mayor exactitud como las de Kohn-Sham. Sin embargo, al no tener un funcional de intercambio electrónico y de correlación de mayor exactitud, ha sido inevitable el uso de aproximaciones. [9] Aunado a esto, los avances en sistemas computacionales han mejorado significativamente el uso de esta técnica, permitiendo calcular valores teóricos de sistemas extremos, limitado por su costo de implementación y el tiempo de cálculo alto. [10]

Un programa para DFT ampliamente usado es CASTEP (originalmente CAMbridge Serial Total Energy Package). El cual se creó a finales de las décadas de los 80's, principios de los 90's, pero desde finales de los 90's el código ha sido actualizado y mejorado añadiendo funciones mejoradas de cálculo. Donde las modelaciones y simulaciones implementadas de moléculas optimizadas permiten calcular parámetros de propiedades fisicoquímicas, p. ej., mecánicas, ópticas, termodinámicas y electrónica. [11]

En el caso de los estudios de óxidos semiconductores por DFT usando CASTEP, [12], [13] contrariamente a lo esperado se han reportado pocos trabajos de procesamiento teórico de alotropismos de  $\text{MnO}_2$ . En el presente trabajo de investigación, se sintetizaron nanovarillas de  $\beta\text{-MnO}_2$ , las cuales fueron caracterizadas por diversas técnicas fisicoquímicas, y complementado el análisis de sus propiedades mecánicas por DFT usando CASTEP. Esto permitirá comprender sus



fortalezas y limitaciones en aplicaciones ambientales.

## 2. Metodología

### 2.1 Síntesis de nanomateriales

Los reactivos utilizados fueron adquiridos con el proveedor de la marca Sigma-Aldrich®, sin modificar las condiciones originales de estos para su uso: permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ , 99.9%), sulfato de manganeso ( $\text{MnSO}_4$ , 99.9%), metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ , 99.8%). Las soluciones se prepararon con agua calidad MilliQ® (18  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$ , Millipore®) utilizando el desionizador Thermo Scientific™.

La síntesis de nanovarillas de  $\beta\text{-MnO}_2$  se realizó por el método de hidrotermal. En un vaso de politetrafluoroetileno (i.e., PTFE, conocido con el nombre comercial como teflón), se depositaron 2.5 mmol de  $\text{MnSO}_4$  y 1 mmol de  $\text{KMnO}_4$  en 30 ml de agua, los cuales se mantuvieron en agitación constante hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, el vaso se colocó en el interior de un reactor tipo autoclave, dejándose en un horno de convección a  $120^\circ\text{C}$  por 12 horas. El producto final fue un precipitado de color marrón, el cual fue separado por centrifugación a 5,000 rpm, y secados y almacenados a  $60^\circ\text{C}$  en el mismo horno.

### 2.2 Caracterización fisicoquímica

Las nanovarillas de  $\beta\text{-MnO}_2$  se confirmaron por SEM, usando un microscopio electrónico de barrido (Tescan®, Vega) operado a 12 kV en modo alta resolución. Además, la fase cristalina se corroboró con un difractor de rayos-X (Bruker®, D8 ADVANCE) operado a 40 kV y 35 mA. Los espectros fueron corridos de 10 a 80 de

$2\theta$  ( $^\circ$ ), con un paso de medición de  $0.01(^\circ)$  y un tiempo de 6 s.

### 2.3 Computacional

Los valores teóricos de las propiedades mecánicas de  $\beta\text{-MnO}_2$  fueron calculados vía DFT, usando el software CASTEP de Materials Studio® (2017). Se utilizó la aproximación de gradiente generalizado (GGA) con el funcional Perdew, Burke, y Ernzerhof para sólidos (PBESOL) y una energía de corte fina de 571.4 eV para la optimización de geometría; el pseudopotencial seleccionado fue OTFG-ultra-soft (del inglés On-The-Fly-Generated) para la interacción entre los electrones de valencia y los núcleos de iones, con un tratamiento relativista Koelling-Harmon. Se usaron los orbitales de valencia del O:  $2s^2 2p^4$  y Mg:  $3d^5 4s^2$ . Por último, se utilizó la misma energía de corte y similares parámetros para el cálculo del tensor de las constantes elásticas ( $C_{ij}$ ). Las cuales fueron usadas para el cálculo de las propiedades mecánicas.

## 3. Resultados y discusión

En la **Figura 1**, se muestra la micrografía de los materiales obtenidos, en ella se puede confirmar que la estructura obtenida corresponde a la esperada, es decir, nanovarillas. Conjuntamente, el resultado de la técnica de difracción de rayos-X confirmó que las nanovarillas coinciden con la fase  $\beta\text{-MnO}_2$ , con grupo espacial  $P4_2/mnm$  (136, ID:mp-510408), coincidiendo con lo reportado en la literatura. [14] [15]

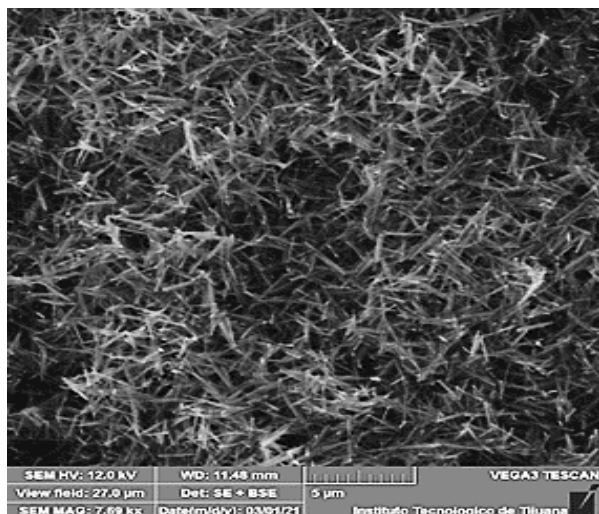


Figura 1. Micrografía MEB de nanovarillas de  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>.

En la **Figura 2**, se muestra el difractograma de la nanoestructura sintetizada. En la figura, se observa la indexación de los picos de intensidad representativos del sistema cristalino en 28.35 (1 1 0), 37.03 (1 0 1), 42.50 (1 1 1), 56.34 (2 1 1), 59.02 (2 0 0), 71.96 (3 0 1) de  $2\theta$  (°).

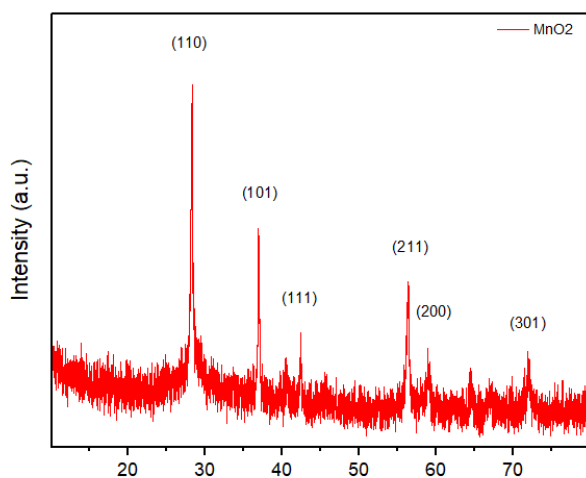


Figura 2. Difractograma XRD de las nanovarillas de  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>.

En la **Figura 3**, se muestra la celda unitaria  $\beta$ -MnO<sub>2</sub> a partir de la cual se realizó la optimización de geometría, permitiendo obtener resultados más consistentes de las propiedades mecánicas. [16] En la **Tabla 1**, se enlistan los

parámetros de la red cristalina después de la optimización de geometría, estos valores se compararon con los valores reportados por Shenggui Ma, [17] usando el paquete de simulación Vienna Ab initio (VASP) con el propósito de comprobar la confiabilidad de la estimación realizada usando el software de CASTEP. Se puede notar la similitud en los resultados obtenidos, indicando la reproducibilidad del sistema  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>.

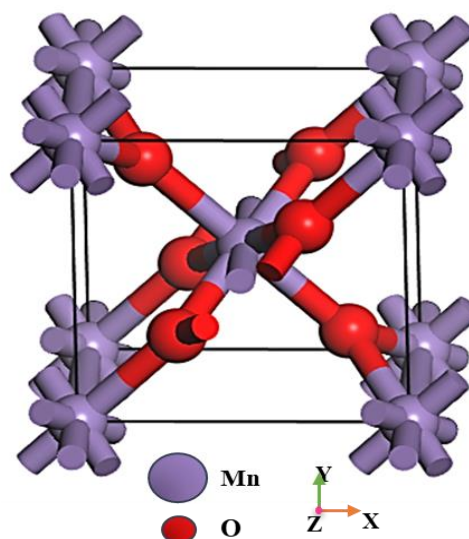


Figura 3. Celda unitaria  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>.

**Tabla 1.** Se muestran los parámetros de red obtenidos después de la optimización de geometría. (Cal. se refiere a los calculados en este estudio y Ref. corresponden a los de Shenggui [17]).

| Parámetros de red cristalina | Cal. (Å) | Ref. (Å) |
|------------------------------|----------|----------|
| a                            | 4.398    | 4.461    |
| c                            | 2.731    | 2.959    |



En la **Tabla 2**, se muestra la matriz simétrica 6 x 6 conformada por las constantes elásticas  $C_{ij}$  calculadas, esta matriz se forma por los componentes de tensión y deformación existentes característicos de la red cristalina. Sin embargo, es posible reducir la cantidad de componentes. En el caso específico del  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>, se reduce a seis componentes [18] [19], los cuales se muestran en la **Tabla 3**. También, en el sistema tetragonal, se cumplen las relaciones de  $C_{ij}$  para la estabilidad indicada en los Criterios de

Born:  $C_{11} > 0, C_{44} > 0, C_{66} > 0, C_{11} - C_{12} > 0$  y  $C_{33} (C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2 < 0$ , [20] por lo que, al permanecer sin la influencia de una presión externa, se considera una estructura cristalina estable. Como se puede muestra en la tabla,  $C_{33} > C_{11}$ , los valores de estas constantes están relacionados con la resistencia en la dirección lineal de los parámetros de celda  $a$  y  $c$ , respectivamente, por lo tanto, el material es menos compresible en la dirección  $c$ . [21]

**Tabla 2.** Matriz simétrica 6 x 6 constituida por las constantes elásticas calculadas.

|           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 217.18643 | 192.29031 | 76.89805  | 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   |
| 192.29031 | 217.18643 | 76.89805  | 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   |
| 76.89805  | 76.89805  | 319.16614 | 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   |
| 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   | 171.07398 | 0.00000   | 0.00000   |
| 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   | 171.07398 | 0.00000   |
| 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   | 0.00000   | 214.62571 |

**Tabla 3.** Valores de las constantes elásticas con sus respectivos índices.

| i | j | $C_{ij}$              |
|---|---|-----------------------|
| 1 | 1 | 217.18643 +/- 43.003  |
| 3 | 3 | 319.16614 +/- 18.388  |
| 4 | 4 | 171.07398 +/- 6.046   |
| 6 | 6 | 214.62571 +/- 20.190  |
| 1 | 2 | 192.29031 +/- 131.041 |
| 1 | 3 | 76.89805 +/- 57.806   |
| 1 | 6 | 0.00000 +/- 0.000     |

A partir de los valores obtenidos de las constantes elásticas  $C_{ij}$ , se calcularon los valores del módulo de volumen ( $K$ ) módulo de Young ( $E$ ), módulo de corte o cizalla ( $G$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) por medio de las aproximaciones de Voigt-Reuss-Hill, donde el modelo de Voigt ( $V$ ) y

Reuss ( $R$ ) asumen una deformación uniforme que representan los limites superior e inferior elástico, y el modelo de Hill ( $H$ ) asume dichos límites y establece el valor promedio. [22] En la **Tabla 4**, se enlistan los valores de cada



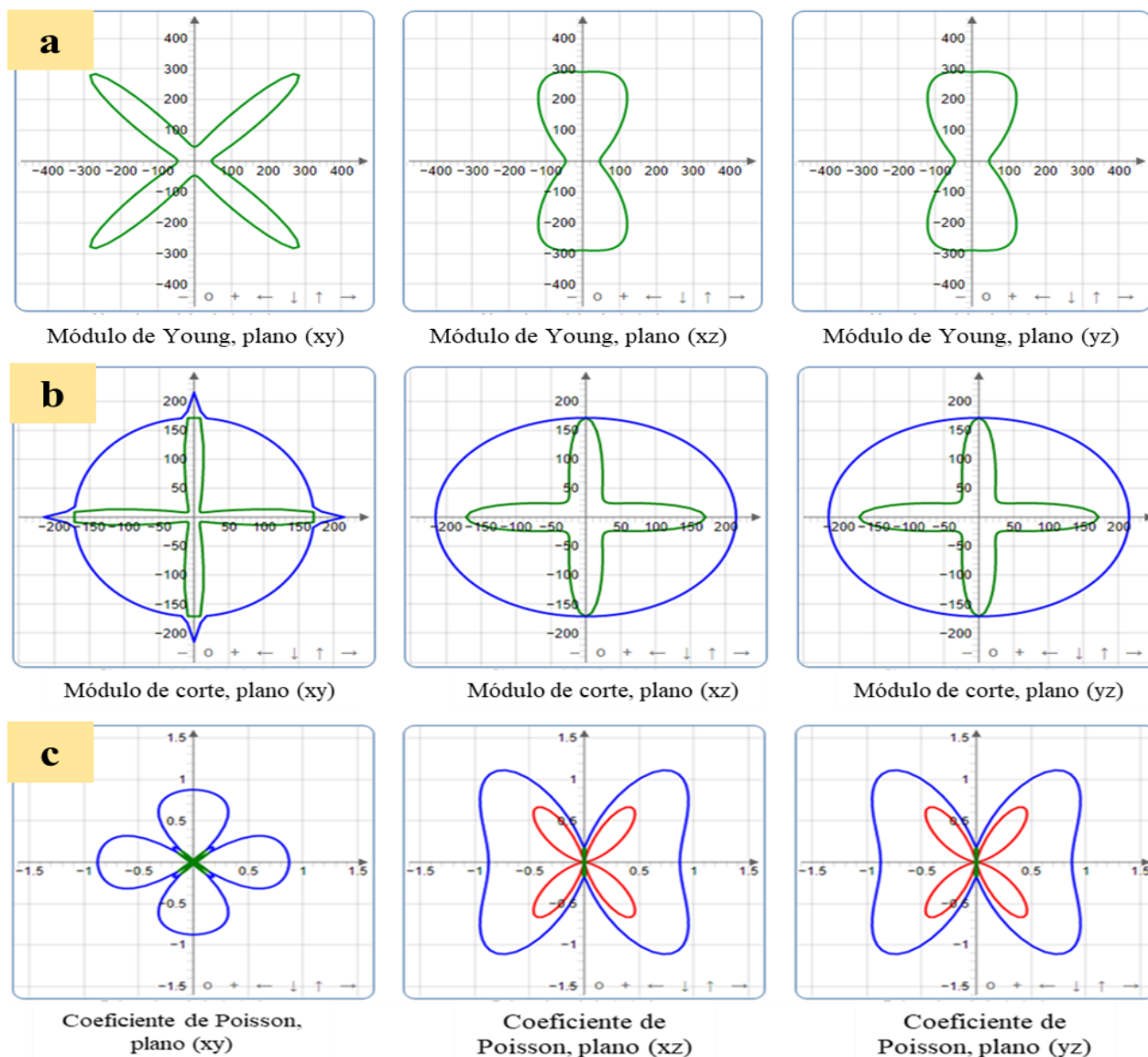
parámetro y el comparativo con los valores reportados por Shenggui.

**Tabla 4.** Valores obtenidos para el módulo de volumen, módulo de Young, módulo de corte y el coeficiente de Poisson por medio de las aproximaciones de Voigt, Reuss y Hill. En la última fila se presentan los resultados obtenidos por Shenggui. [17] La última columna muestra la razón del módulo de volumen entre el módulo de corte.

|                        | Módulo de volumen ( $K$ ) | Módulo de Young ( $E$ ) | Módulo de corte ( $G$ ) | Coficiente Poisson ( $\nu$ ) | de $K/G$          |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|
| <b>Voigt (V)</b>       | $K_V = 160.63$ GPa        | $E_V = 322.78$ GPa      | $G_V = 138.52$ GPa      | $\nu_V = 0.1651$             | $K_V/G_V = 1.159$ |
| <b>Reuss (R)</b>       | $K_R = 160.58$ GPa        | $E_R = 130.24$ GPa      | $G_R = 47.713$ GPa      | $\nu_R = 0.36482$            | $K_R/G_R = 3.365$ |
| <b>Hill (H)</b>        | $K_H = 160.61$ GPa        | $E_H = 234.1$ GPa       | $G_H = 93.116$ GPa      | $\nu_H = 0.25706$            | $K_H/G_H = 1.725$ |
| <b>Shenggui (VASP)</b> | 188.13                    | 229.81                  | 88.64                   | 0.30                         | 2.122             |

Los resultados sugieren que al presentar  $C_{44}$  un valor grande, al igual que módulo de volumen y de corte, se puede suponer que el material presenta considerable dureza. [23] Además, la literatura establece que cuando el cociente del módulo de volumen entre el módulo de corte usando el modelo de Hill es mayor a 1.75 ( $K_H/G_H > 1.75$ ), se tiene un material dúctil; [24] en este caso no se cumple, ya que la relación es  $160.61$  GPa/  $93.116$  GPa = 1.725, lo cual confirma la suposición de dureza del material mencionada

anteriormente. Sin embargo, este resultado contradice lo reportado en la referencia, [17] donde  $K_H/G_H$  sí es mayor a 1.75 y establecen el  $\beta$ -MnO<sub>2</sub> como un material dúctil. Como se puede observar en la tabla, los valores calculados por Shenggui (VASP) difieren a los obtenidos en este estudio, siendo los valores del modelo de Hill más cercanos [18] [25] En la **Figura 4**, se observan las gráficas de deformación del módulo de Young, módulo de corte y coeficiente de Poisson en los planos  $xy$ ,  $xz$  y  $yz$ . [17], [26]



**Figura 4.** Se muestran los gráficos de deformación en las direcciones xy, xz y yz, respectivamente: a) Módulo de Young, b) Módulo de corte, c) Coeficiente de Poisson.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo, se logró confirmar, gracias a las técnicas fisicoquímicas de caracterización, que los materiales obtenidos eran los esperados. Las propiedades mecánicas fueron calculadas, indicando una estructura estable. A partir del análisis de las constantes elásticas, se puede

concluir que el material presenta cierta dureza. Con las propiedades calculadas en este estudio se podrán obtener otros parámetros teóricos, además de realizar simulaciones adicionales para entender los fenómenos superficiales y de energía molecular y atómica de los materiales de manganeso en aplicaciones reales, como remoción de contaminantes.





## 5. Reconocimiento de autoría

*María Alejandra Gómez Murillo*: Redacción del borrador original; metodología; análisis e investigación; y edición. *Balter Trujillo Navarrete*: Conceptualización y metodología; análisis e investigación; escritura; revisión; edición; supervisión; y administración de proyecto.

### Referencias

[1] H. Wang et al., "Release of deposited MnO<sub>2</sub> nanoparticles from aqueous surfaces," *J. Environ. Sci.*, vol. 90, no. December, pp. 234-243, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.12.011>.

[2] M. V. Curia, "Manganeso. Generalidades," in *Estudio fisicoquímico y catalítico del sistema Mn-O-V*, 2010, p. 209.

[3] Z. Yang, C. Zhou, W. Zhang, H. Li, and M. Chen, "β-MnO<sub>2</sub> nanorods: A new and efficient catalyst for isoamyl acetate synthesis," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 356, no. 1-3, pp. 134-139, Mar. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.01.007>

[4] S. Kim, H. Yoon, D. Shin, J. Lee, and J. Yoon, "Electrochemical selective ion separation in capacitive deionization with sodium manganese oxide," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 506, pp. 644-648, Nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.054>

[5] B. Lan et al., "Multifunctional free-standing membrane from the self-assembly of ultralong MnO<sub>2</sub> nanowires," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 5, no. 15, pp. 7458-7464, 2013. <https://doi.org/10.1021/am401774r>

[6] M. S. Selim, Z. Hao, Y. Jiang, M. Yi, and Y. Zhang, "Controlled-synthesis of β-MnO<sub>2</sub> nanorods through a γ-manganite precursor route," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 235, no. June, p. 121733, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.12.1733>

[7] Y. Kumar, S. Chopra, A. Gupta, Y. Kumar, S. J. Uke, and S. P. Mardikar, "Low temperature synthesis of MnO<sub>2</sub> nanostructures for supercapacitor application," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 3, pp. 566-574, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.06.002>

[8] S. Balamurugan, A. Rajalakshmi, and D. Balamurugan, "Acetaldehyde sensing property of spray deposited β-MnO<sub>2</sub> thin films," *J. Alloys Compd.*, vol. 650, pp. 863-870, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.063>

[9] D. S. Sholl and J. A. Steckel, "What is Density Functional Theory?," in *Density Functional Theory*, 2009, pp. 1-33. <https://doi.org/10.1002/9780470447710>

[10] V. Milman et al., "Electron and vibrational spectroscopies using DFT, plane waves and pseudopotentials: CASTEP implementation," *J. Mol. Struct. THEOCHEM*, vol. 954, no. 1-3, pp. 22-35, Aug. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.theochem.2009.12.040>

[11] S. J. Clark et al., "First principles methods using CASTEP," *Zeitschrift für Krist. - Cryst. Mater.*, vol. 220, no. 5/6, pp. 567-570, Jan. 2005. <https://doi.org/10.1524/zkri.220.5.567.65075>

[12] L. B. Shi, C. Y. Xu, and H. K. Yuan, "A CASTEP study on magnetic properties of C-doped ZnO crystal," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 406, no. 17, pp. 3187-3191, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.05.022>



[13] M. Rizwan, Hajra, I. Zeba, M. Shakil, S. S. A. Gillani, and Z. Usman, "Electronic, structural and optical properties of BaTiO<sub>3</sub> doped with lanthanum (La): Insight from DFT calculation," *Optik (Stuttg.)*, vol. 211, no. February, p. 164611, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jjleo.2020.164611>

[14] M. Musil, B. Choi, and A. Tsutsumi, "Morphology and Electrochemical Properties of  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -, and  $\delta$ -MnO<sub>2</sub> Synthesized by Redox Method," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 162, no. 10, pp. A2058-A2065, 2015. <https://doi.org/10.1149/2.0201510jes>

[15] D. Gangwar and C. Rath, "Structural, optical and magnetic properties of  $\alpha$ - and  $\beta$ -MnO<sub>2</sub> nanorods," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 557, no. March, p. 149693, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149693>

[16] M. Studio, "Modules Tutorials Materials Studio 2017," Tutorial. 2016.

[17] S. Ma, X. Ye, X. Jiang, W. Cen, W. Jiang, and H. Wang, "First principles calculation of mechanical, dynamical and thermodynamic properties of MnO<sub>2</sub> with four crystal phases," *J. Alloys Compd.*, vol. 852, p. 157007, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157007>

[18] T. C. Linares Fuentes, C. J. A. Garrido Schaeffer, W. More, N. F. Cornejo, A. Tamayo, and J. Rubio, "Teoría del Funcional de la Densidad en cristales de silicato de potasio. Aplicación al cálculo de propiedades mecánicas y microdureza Vickers en vidrios," *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, pp. 1-14, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.08.001>

[19] M. I. Kholil and M. T. H. Bhuiyan, "A theoretical (DFT) study of structural, mechanical and thermodynamic properties of manganese arsenides CsMn<sub>4</sub>As<sub>3</sub> and RbMn<sub>4</sub>As<sub>3</sub>," *Comput. Condens. Matter*, vol. 26, p. e00526, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cocom.2020.e00526>

[20] M. Chepkoech, D. P. Joubert, and G. O. Amolo, "First principles calculations of the thermoelectric properties of  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> and  $\beta$ -MnO<sub>2</sub>," *Eur. Phys. J. B*, vol. 91, no. 12, p. 301, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2018-90321-4>

[21] D. A. J. Montero, "Estudio mecano-cuántico de materiales desde primeros principios: propiedades elásticas y estabilidad del EuVO<sub>4</sub>," Universidad de La Laguna, 2014.

[22] E. Scholtzová and D. Tunega, "Prediction of mechanical properties of grafted kaolinite - A DFT study," *Appl. Clay Sci.*, vol. 193, no. May, p. 105692, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105692>

[23] H. Joshi, T. V. Vu, N. N. Hieu, R. Khenata, and D. P. Rai, "Mechanical and thermodynamical properties of Fe<sub>2</sub>CoAl a full-Heusler alloy under hydrostatic pressure: A DFT study," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 270, no. March, p. 124792, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124792>

[24] A. Benamrani, S. Daoud, M. M. Abdus Salam, and H. Rekab-Djabri, "Structural, elastic and thermodynamic properties of YRh: DFT study," *Mater. Today Commun.*, vol. 28, p. 102529, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102529>

[25] C. M. Ruiz and J. M. Osorio-Gillén, "Estudio teórico de las propiedades elásticas de



los minerales  $\text{Cu}_3\text{TMSe}_4$  (TM = V, Nb, Ta) por medio de cálculos atomísticos de primeros principios," Ing. y Cienc. - ing.cienc., vol. 7, no. 13, pp. 131-150, 2011, [Online]. Available: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/404>.

[26] R. Gaillac, P. Pullumbi, and F.-X. Coudert, "ELATE: an open-source online application for analysis and visualization of elastic tensors," J. Phys. Condens. Matter, vol. 28, no. 27, p. 275201, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/28/27/275201>

Derechos de Autor (c) 2022 María Alejandra Gómez Murillo, Balter Trujillo Navarrete



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Effect of reaction parameters on WO<sub>x</sub> nanostructures by the solvothermal process

## *Efecto de los parámetros de reacción en nanoestructuras de WO<sub>x</sub> por el proceso solvotermal*

Amelia Olivas Sarabia <sup>1</sup>, Marlene N Cardoza-Contreras <sup>2</sup>, Marcos Alan Cota-Leal <sup>1</sup>, Selene Sepúlveda Guzmán <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Km 107 carretera Tijuana-Ensenada, CP. 22860, Ensenada, Baja California, México

<sup>2</sup>Posgrado de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Km 107 carretera Tijuana-Ensenada, CP. 22860, Ensenada, Baja California, México

<sup>3</sup>Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Nuevo León, Avenida Alianza 101 Sur KM. 10 de la nueva carretera internacional de Monterrey, PIIT Monterrey, CP. 66600, Apodaca, Nuevo León, México

**Corresponding author:** Amelia Olivas Sarabia, Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Km 107 carretera Tijuana-Ensenada, CP. 22860, Ensenada, Baja California, México. E-mail: [aolivas@cnyun.unam.mx](mailto:aolivas@cnyun.unam.mx). ORCID: 0000-0001-7748-2579.

**Recibido:** 13 de Mayo del 2021

**Aceptado:** 13 de Septiembre del 2021

**Publicado:** 24 de Septiembre del 2021

**Abstract.** - *In this work, nanowires and nanorods of WO<sub>x</sub> have been synthesized by the solvothermal method. The effect of reaction time and acetic acid as solvent were studied. X-ray diffraction (XRD) patterns showed the monoclinic WO<sub>2.72</sub>, WO<sub>2.79</sub> and orthorhombic WO<sub>3</sub> crystalline structures. Scanning Electron Microscopy (SEM) and High-Resolution Transmission Electronic Microscopy (HRTEM) images presented nanostructures such as nanowires and nanorods at different sizes. Band gap energies were supplied by Ultra Violet visible (UV-vis) absorption spectra. The Photoluminescence (PL) spectra exhibited three emission peaks in the blue zone at 440, 460 and 484 nm. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) were used to calculate W<sub>6+</sub>, W<sub>5+</sub> and W<sub>4+</sub> oxidation states. The results showed that increasing the reaction time from 10 h to 24 h affected the crystalline structure from monoclinic to orthorhombic. Moreover, with the addition of acetic acid as solvent, the crystal structure is not affected, but stabilizes the monoclinic phase in the course of time.*

**Keywords:** Acetic acid; WO<sub>x</sub> nanowires; Solvothermal; Optical properties.

**Resumen.** - *En este trabajo se han sintetizado nanocables y nanovarillas de WO<sub>x</sub> por el método solvotermal. Se estudió el efecto del tiempo de reacción y del ácido acético como disolvente. Los patrones de difracción de rayos X (XRD) mostraron las estructuras cristalinas monoclinicas WO<sub>2.72</sub>, WO<sub>2.79</sub> y ortorrómbicas WO<sub>3</sub>. Las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) presentaron nanoestructuras como nanocables y nanobarras de diferentes tamaños. Las energías de banda prohibida fueron suministradas por espectros de absorción ultravioleta visible (UV-vis). Los espectros de fotoluminiscencia (PL) exhibieron tres picos de emisión en la zona azul a 440, 460 y 484 nm. Se utilizó espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) para calcular los estados de oxidación W<sub>6+</sub>, W<sub>5+</sub> y W<sub>4+</sub>. Los resultados mostraron que el aumento del tiempo de reacción de 10 h a 24 h afectaba la estructura cristalina de monoclinica a ortorrómbica. Además, con la adición de ácido acético como disolvente, la estructura cristalina no se ve afectada, pero estabiliza la fase monoclinica con el paso del tiempo.*

**Palabras clave:** Ácido acético; Nanocables de WO<sub>x</sub>; Solvotermal; Propiedades ópticas.



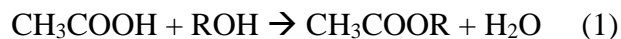
## 1. Introduction

Nanostructures of metal oxide semiconductors are highly attractive due to their optical and electronic applications. Tungsten oxides have *n*-type conductivity with an indirect wide band gap which ranges from 2.5 to 2.8 eV [1], and have been of great interest because of promising chemical and physical properties. In the last decades, tungsten oxides have been paid great attention as a consequence of their possible applications in electro-chromic devices [2], gas sensors [3], field emission display [4], catalyst [5], [6] and electronic devices of nanostructures [7]. Many methods have been developed to synthesize 1-D nanostructures, such as chemical vapor deposition [8], pulsed-laser deposition [9], [10], template assisted growth [11], thermal annealing [12] and solvothermal synthesis [13], [14]. The solvothermal synthesis is the most simple and effective method due to low temperature growth of nanostructures and low cost. Here, we report the synthesis and characterization of tungsten oxide nanorods and nanowires by solvothermal method varying reaction parameters.

## 2. Experimental

Metal alkoxides are derivated from alcohols that can be easily removed by hydrolysis and heating treatment in order to obtain high purity metallic oxides. In usual methods, metal alkoxides are synthesized by direct reaction of reactive metals and alcohols [15]. Ethanol and acetic acid as a solvent have been used in metallic oxides nanostructures principally to favor an esterification reaction between acetic acid and an alcohol that influences the formation of a certain type of metallic oxide modifying the reactivity of the metal alkoxide [16], [17]. In this method, reacts homogeneously with a water molecule

which is condensed from an esterification process as follows:



A starting solution of 25 mM of tungsten hexachloride (99.99%,  $\text{WCl}_6$ , Sigma-Aldrich) was added in 38 mL of ethanol (99.8% HPLC, Sigma-Aldrich). The prepared solution was transferred to a 45 mL teflon-lined stainless steel autoclave. Solvothermal synthesis was conducted at 200 °C using an electric oven. Two experiments were carried out varying the reaction time for 10 h and 24 h. After reaction, the autoclave was cool down at room temperature. After the above, a blue precipitate was collected and washed with ethanol, and then dried at 80 °C. In a different approach, 0.5 mL of acetic acid (ACS reagent,  $\geq 99.7\%$ , Sigma-Aldrich) was added to the precursor solution ( $\text{WCl}_6$ /ethanol) and the solvothermal reaction was conducted at 200 °C for 10 h and 24 h. Structural characterization and morphology were studied by X-ray diffraction, XRD (Diffractometer Rigaku, Geigerflex D/Max), scanning electron microscopy, SEM (FEI NOVA 200 NANOSEM) and high-resolution transmission electron microscope, HRTEM (JEOL-2010). Finally, ultra violet visible, UV-vis, absorption spectra for all the as-prepared  $\text{WO}_x$  samples were carried out using a VARIAN CARY 300 double beam UV-Vis's spectrophotometer. X-ray photoelectron spectroscopy, XPS (SPECS) was used to analyzing oxygen vacancies in the samples.

## 3. Results and discussion

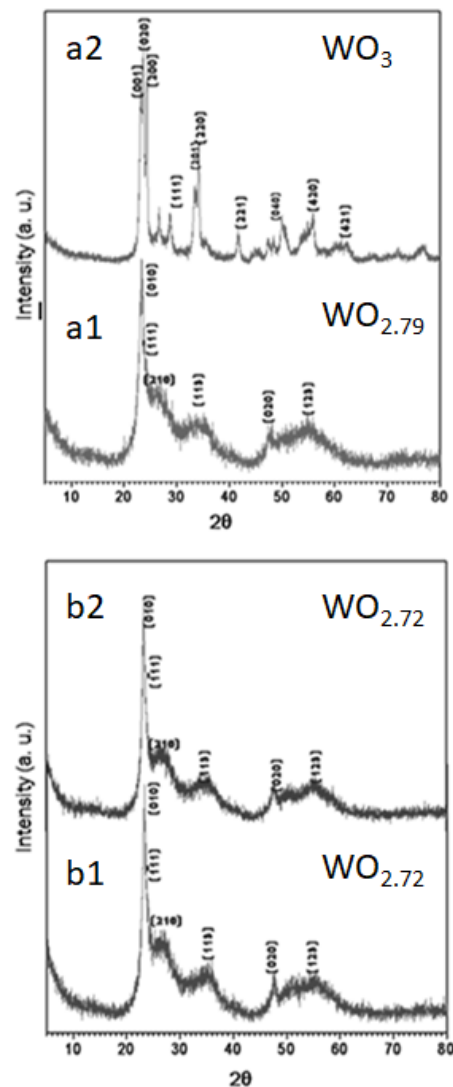
### 3.1 Structural analysis

Figure 1 depicts the XRD patterns of the tungsten oxide nanostructures synthesized at different solvothermal reaction conditions. The XRD



peaks for the sample obtained after 10 h of reaction with  $\text{WCl}_6$ /ethanol shows the monoclinic  $\text{WO}_{2.79}$  phase with preferential orientation along [101] and observed relative high intensity (101). The lattice parameters measured are,  $a$  (Å) = 18.28,  $b$  (Å) = 3.775,  $c$  (Å) = 13.98 and  $\beta$  (°) = 115.2, these are according to (JCPDS Card No. 05-0392), figure (a1). However, when the reaction time was increased to 24 h the structure turned to orthorhombic  $\text{WO}_3$  phase,  $a$  (Å) = 7.384,  $b$  (Å) = 7.512 and  $c$  (Å) = 3.846, with JCPDS card 20-1324 Figure 1(a2). When acetic acid was introduced to the reaction, the XRD patterns showed the monoclinic  $\text{WO}_{2.72}$  structures for both reaction time products Figure 1 (b1) and (b2).

Figure 2 shows the SEM images of the as-prepared tungsten oxides powders synthesized using different solvothermal reaction conditions. The sample prepared with  $\text{WCl}_6$ /ethanol at 10 h shows spherical and semi-spherical nanowires aggregates with diameters from 500 nm-1.5  $\mu\text{m}$ , figure 2 (a). This morphology was affected when the reaction time increased from 10 to 24 since the nanowires aggregates get lost, and nanorods with diameter of 55-65 nm appeared, figure 2 (b). The sample synthesized with  $\text{WCl}_6$ /ethanol/acetic acid precursor for 10 h does not affect the nanostructures of the  $\text{WO}_{2.72}$  powders obtained without acetic acid, figure 2 (c). Figure 2 (d) shows nanowire arrays of  $\text{WO}_{2.72}$  products at 24 h of reaction in the  $\text{WCl}_6$ /ethanol/acetic system.



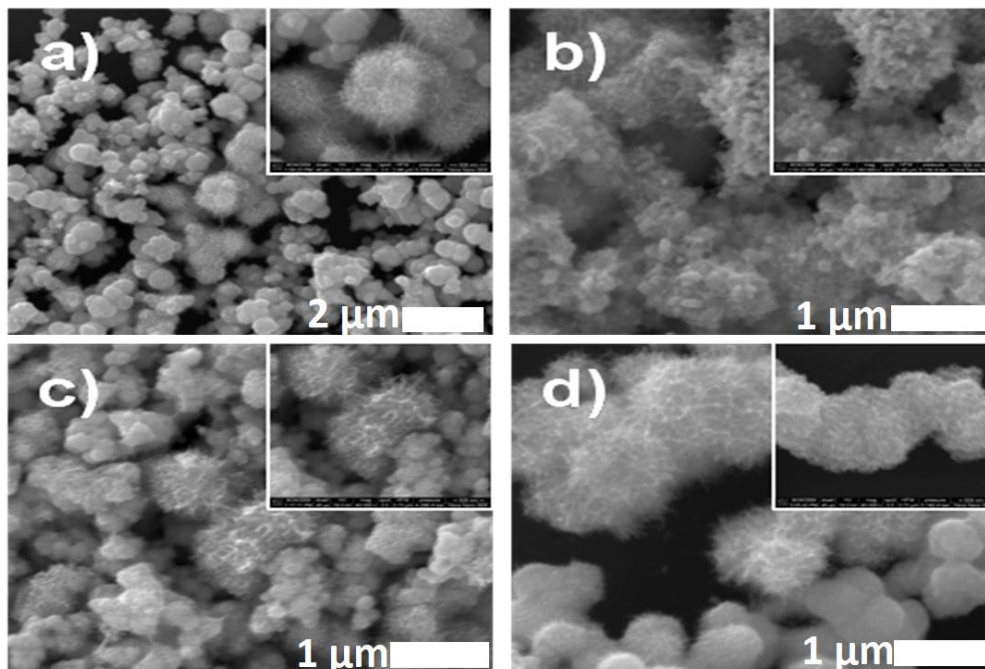
**Figure 1.** XRD patterns images of tungsten oxide nanostructures synthesized at  $200^\circ\text{C}$ .  $\text{WCl}_6$ /ethanol system at (a1) 10 h and (a2) 24 h, respectively.  $\text{WCl}_6$ /ethanol/acetic acid system at (b1) 10 h and (b2) 24 h, respectively.

Figure 3 depicts HRTEM images of  $\text{WO}_{2.79}$  powder obtained after 10 h reaction time. These images showed the presence of nanowire arrays with a 10 nm nanowire average diameter size, Figure 3 (a), this observation is the same found in the SEM results, Figure 2 (a). The spacing of the lattice is around 0.376 Å, as shown in Figure 3 (e). This plane can be well indexed as (010) plane of the monoclinic  $\text{WO}_{2.72}$  crystal, according with the results of XRD on the samples, this



suggest that the nanowires grow as single crystals with a preferential growth along the  $\langle 010 \rangle$  direction. The HRTEM image for the sample prepared at 24 h of reaction time shows nanowires with 8 nm of average diameter size

and nanorods with diameters ranging from 50 to 150 nm, Figure 2 (b). The respective HRTEM image (Figure 3f) shows nanowires that grow along the  $\langle 001 \rangle$  direction.



**Figure 2.** SEM images of synthesized tungsten oxide nanostructures.  $WCl_6$ /ethanol system at (a) 10 h and (b) 24 h respectively.  $WCl_6$ /ethanol/acetic acid system at (c) 10 h and (d) 24 h respectively. Insets show images of high magnification.

The HRTEM image of the sample prepared using acetic acid as additive and at 10 h of reaction time is presented in Figure 3 (c). The presence of nanowires aggregates with diameter size ranging from 200-300 nm was also observed. In addition, the diameter size of the nanowires was 4 nm. When the reaction was carried out at 24 h of reaction time the average diameter size of nanowires in the hiperbranched arrays increased to 7 nm, Figure 3 (d).

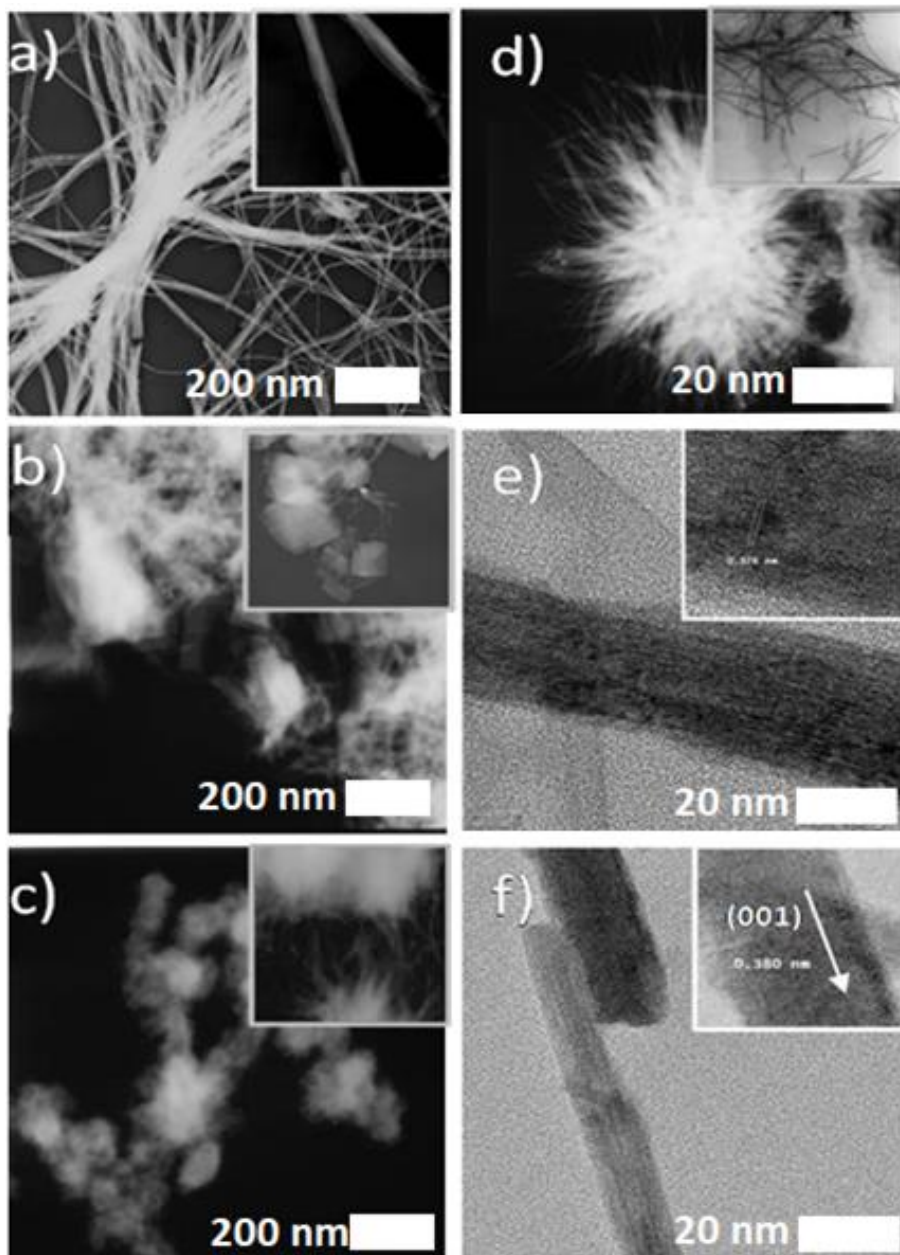
Based on SEM, TEM, HRTEM and XRD results we propose a possible  $WO_x$  nanowires growth mechanism. For the case of the first conditions or only ethanol as solvent and 10 h of reaction, reaction situation bring about the formation of the  $WO_{2.79}$  nucleus given the conventional mechanism of growth and nucleation, rendering

the monoclinic phase. As soon as the temperature get to the 200 °C and the nucleus has reached optimums size to not dissolve, the production of these particles continues. During the growth process, the nanowires display an epitaxial growth in the  $\langle 010 \rangle$  direction as single crystals, in agreement to the results obtained by HRTEM, Figure 3(e) [18]. As the reaction continues, the high surface energy of nanowires is passivated by self-assembly and form spherical aggregates. When the reaction is kept for 24 h, the concentration of the number of growing species diminished and at solvothermal conditions the system enters into the Ostwald ripening regime, which favors the formation of nanorods and aggregation arrays like hiperbranched particles. Recent DFT studies have revealed that the creation of vacancies and defects is energetically



unfavorable in monoclinic compounds [19]. This prompted us look for the formation of vacancies for both orthorhombic and monoclinic phases and it is larger for the orthorhombic phase due to the deficiencies of oxygen. This suggests that, the orthorhombic phase to be more stable. The above

can explain the driving force behind the phase formation and the transformation behavior from monoclinic to orthorhombic observed in these materials [20].



**Figure 3.** HRTEM images of synthesized tungsten oxide nanostructures.  $WCl_6$ /ethanol system at (a,e)10 h and (b,f) 24 h, respectively.  $WCl_6$ /ethanol/acetic acid system at (c) 10 h and (d) 24 h.

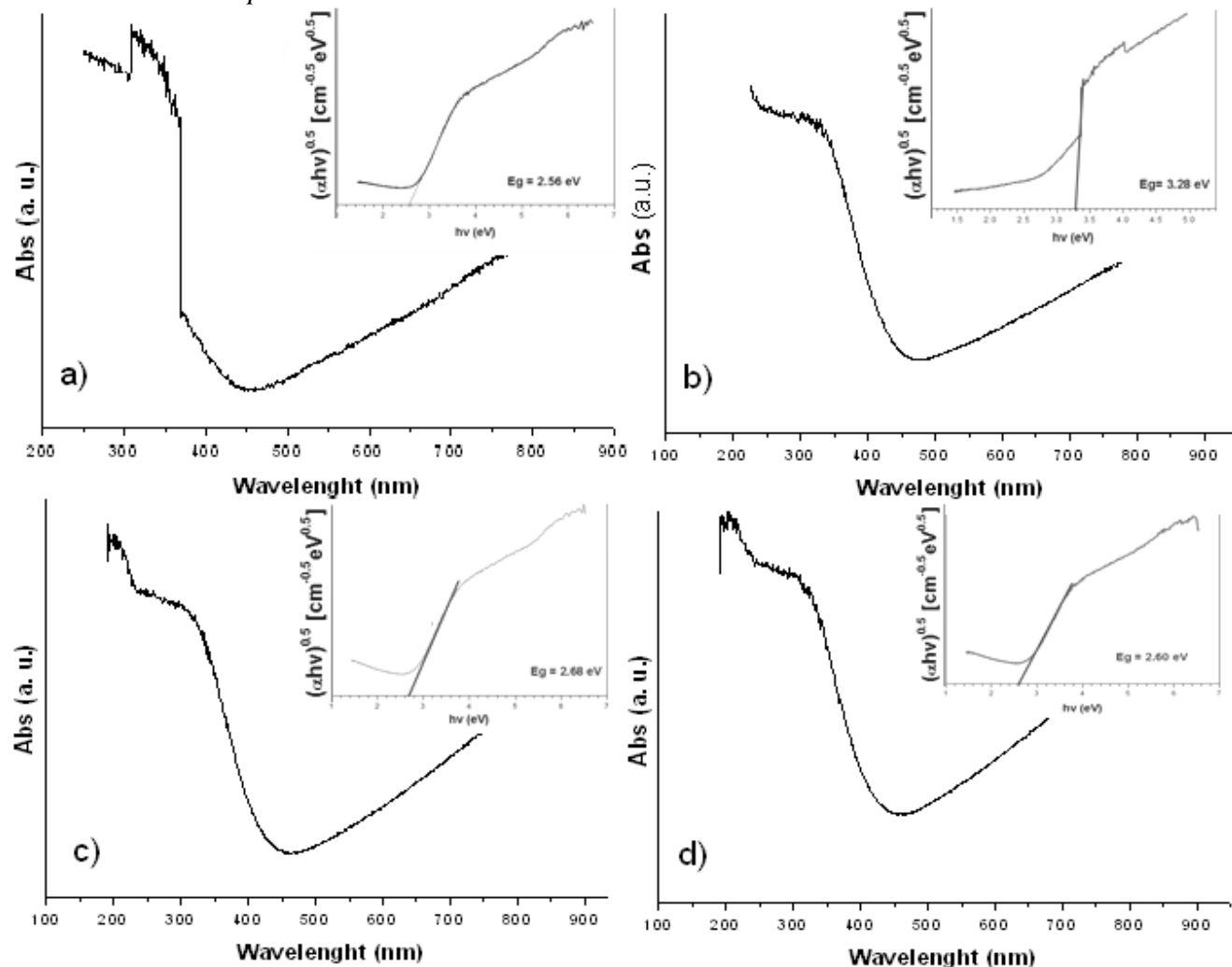




More studies on both phases could be done like Differential Scanning Calorimetry (DSC) curves of thermodynamic field [21] but these are beyond the scope of this work. For the case when acetic acid was added and 10 h of reaction,

### 3.2 Optical measurements

#### 3.2.1. UV-Vis absorption



**Figure 5.** UV-Vis spectra of the obtained WO<sub>x</sub> from a) WCl<sub>6</sub>/ethanol 10 h b) WCl<sub>6</sub>/ethanol/acetic acid 10 h c) WCl<sub>6</sub>/ethanol 24 h and d) WCl<sub>6</sub>/ethanol/acetic acid 24 h reaction conditions.

Optical band gap can be obtained from the UV region by means of the fundamental absorption edge or coefficient and it is determined by considering an indirect transition between the 2p

Figure 5 shows the UV-vis absorption spectra for all the as-prepared WO<sub>x</sub> samples. Here a slide of maximum absorption to UV region can be observed, which suggests a quantum confinement effect due to the presence of nanometer size particles.

electrons from the valence band of the oxygen and the 5d conduction bands of tungsten [22]. The optical band gap is formally described as the intercept of the plot of  $(\alpha hv)^{1/2}$  against  $hv$ , where



$\alpha$  and  $h\nu$  denote the absorption coefficient and photon energy [23], respectively. The obtained

WO<sub>x</sub> nanostructures band gap energies and particle sizes are presented in Table 1.

**Table 1.** Band gap energies and particle sizes of WO<sub>x</sub> nanostructures for both systems

| System                        | E <sub>g</sub> (eV) | Particle size (nm) |
|-------------------------------|---------------------|--------------------|
| WCl6/ethanol 10 h             | 2.56 (484 nm)       | 10                 |
| WCl6/ethanol 24 h             | 2.68 (463 nm)       | 8                  |
| WCl6/ethanol/acetic acid 10 h | 3.28 (378 nm)       | 4                  |
| WCl6/ethanol/acetic acid 24 h | 2.60 (477 nm)       | 7                  |

As can be observed from Table 1, the quantum size effect optical band gap value increases when the average particle size decreased, this is possible due to the quantum confinement size. The higher band gap energy value was the one from the WO<sub>x</sub> obtained using acetic acid as an additive at 10 h with an average diameter size of 4 nm.

### 3.2.2. Photoluminescence (PL) spectra

In order to study the optical properties of the synthesized nanostructures we used the PL spectra. The WO<sub>x</sub> prepared under hydrothermal conditions at 10 and 24 h exhibit three emission peaks in the blue zone at 440, 460 and 484 nm. The blue emission observed for WO<sub>x</sub> has not been completely clarified, but several works have focused in its study. The emissions at 484 nm and 460 nm are attributed to the indirect band to band transition of tungsten oxide, according to the values of band gap energies for WO<sub>2.72</sub> nanowires (2.56 eV) and WO<sub>3</sub> nanowires/nanorods (2.68 eV) for the samples prepared under hydrothermal conditions at 10 and 24 hours of reaction time, respectively. On the other hand, the transitions in the blue region have been assumed as a result of the presence of oxygen vacancies in the structure of the WO<sub>3-x</sub> nanowires. According to studies carried out by Jian Yi, *et al.* [24]. The emissions of three-dimensional nanowires nets are

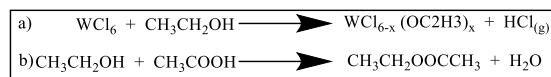
attributed to structural and surface defects based on non-stoichiometric tungsten oxide (WO<sub>3-x</sub>). Also, the spectra for the products prepared using acetic acid as additive at 10 and 24 h of reaction time are presented in figure 5 (a). The sample prepared at 10 h presents PL emission very similar to the sample prepared without acetic acid with 3 emission shoulders at 439, 458 and 484 nm. Nevertheless, in the sample synthesized at 24 h in presence of acetic acid an intense UV emission at 380.5 nm was observed, besides the emission in the visible region, figure 5 (b). This UV emission is not typical; nevertheless it already has been reported by J. Wang, *et al* [25]. These authors studied the luminescence of WO<sub>3</sub> nanosheets obtaining two emissions in the UV region which were attributed to oxygen vacancies. To obtain major information about the presence of these oxygen vacancies, the samples were analyzed by XPS using monochromatized Al-K $\alpha$  radiation with photon energy of 1486.6 eV.

The XPS spectra for the W<sub>4f</sub> and O<sub>1s</sub> peaks for the WO<sub>x</sub> prepared under solvothermal conditions at 10 and 24 h are shown in figure 6 (a) and (b), respectively. At 10 h the XPS spectra showed that the peak for O<sub>1s</sub> was at 530.35 eV. 4f peaks binding energies were at 38.0 and 36.0 eV, which corresponds to spin-orbit splitting of the W 4f<sub>7/2</sub> and W 4f<sub>5/2</sub> components, respectively [30]. W<sup>6+</sup>,



$W^{5+}$  and  $W^{4+}$  oxidation states of the  $W_{4f}$  peak depict to the  $WO_{2.72}$  phase. These results are consistent to Angelis, B. A. and Karuppanan S. [26], [27]. While at 24 h only the  $W_{6+}$  and  $W_{5+}$  oxidation states appear in the  $W_{4f}$  peak deconvolution which agrees with literature reported for the  $WO_3$  phase [27]. The peak position for O1s at 24 h was 530.4 eV. The XPS collected spectra data for both systems is showed in table 2. The compositional stoichiometry O/W was calculated from the relative intensities of the XPS spectra of all procedures and showed in Table 2.

Here, one can observe that all the samples have oxygen deficiencies. This is definitively due to the presence of oxygen vacancies which are common in  $WO_x$  structures. It is necessary to mention that the sample corresponding to the  $WCl_6$ /ethanol/acetic acid system at 24 h is the one that has a high deficiency of oxygen ( $O/W=0.7$ ) and also the one that has the highest concentration of  $W^{5+}$  (40.02%). This supports the photoluminescence results where the same sample presents an intense emission in the UV region also presents a higher concentration of oxygen vacancies. A possible explanation to this is that in the  $WO_x$  sample prepared using acetic acid as additive during esterification reaction water molecules were generated and they can hydrolyze the  $WCl_{6-x}(OC_2H_3)_x$  complexes which were produced in the reaction between  $WCl_6$  and ethanol. Here the  $W^{6+}$  can be reduced to  $W^{5+}$  during the oxidative esterification reaction of ethanol in ethyl acetate (see Scheme 1). This way one can expect that the addition of acetic acid to the precursor solution  $WCl_6$ /ethanol causes a major concentration of  $W^{5+}$  in the final product in function of the time.



**Scheme 1.** (a) Reaction between tungsten hexachloride and ethanol, (b) esterification reaction between ethanol and acetic acid.

#### 4. Conclusions

$WO_x$  nanowires were obtained by using a simple solvothermal method varying the reaction time and the use of acetic acid as an additive in the precursor solution. XRD patterns showed the monoclinic  $WO_{2.79}$  and orthorhombic  $WO_3$  phases. SEM and TEM images showed nanowires (500 nm-1.5  $\mu$ m) and nanorods (55-65 nm) structures. UV-Vis absorption presented a range of band gap energies depending of the particle size (4 nm-3.28 eV) and (10 nm-2.56 eV). The PL spectra exhibited three emission peaks in the blue zone at 440, 460 and 484 nm.  $W^{6+}$ ,  $W^{5+}$  and  $W^{4+}$  oxidation states of the  $W_{4f}$  peak depict to the  $WO_{2.72}$  phase were supplied by XPS. The results showed that increasing the reaction time from 10 h to 24 h affected the crystalline structure changing from monoclinic to orthorhombic. Moreover, with the addition of acetic acid as solvent, the crystal structure is not affected, but stabilizes the monoclinic phase in the course of time.

#### 5. Authorship acknowledgement

*Amelia Olivas Sarabia:* Resources; Supervision; Project administration; Funding acquisition. *Marlene N Cardoza-Contreras:* Methodology; Investigation. *Gonzalo Lastra Medina:* Writing - Original Draft. *Marcos Alan Cota-Leal:* Writing - Review & Editing. *Selene Sepúlveda Guzmán:* Methodology; Resources; Supervision.

#### 6. Acknowledgements

The authors are grateful to F. Ruiz, Israel Gradilla, E. Aparicio and E. Flores from CNYN-



UNAM and to F. Brown from UNISON for their technical assistance, and PAPIT-UNAM project number IN107220 for their financial aid. M. A. Cota-Leal gratefully acknowledges the postdoctoral grant from the DGAPA-UNAM program.

### References

[1] M. Ling, C. S. Blackman, R. G. Palgrave, C. Sotelo-Vazquez, A. Kafizas, and I. P. Parkin, "Correlation of Optical Properties, Electronic Structure, and Photocatalytic Activity in Nanostructured Tungsten Oxide," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 4, no. 18, p. 1700064, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1002/admi.201700064>

[2] D. Ma, T. Li, Z. Xu, L. Wang, and J. Wang, "Electrochromic devices based on tungsten oxide films with honeycomb-like nanostructures and nanoribbons array," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 177, no. December 2016, pp. 51-56, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.009>

[3] C. Dong, R. Zhao, L. Yao, Y. Ran, X. Zhang, and Y. Wang, "A review on WO<sub>3</sub> based gas sensors: Morphology control and enhanced sensing properties," *J. Alloys Compd.*, vol. 820, p. 153194, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153194>

[4] J. Liu, Z. Zhang, Y. Zhao, X. Su, S. Liu, and E. Wang, "Tuning the Field-Emission Properties of Tungsten Oxide Nanorods," *Small*, vol. 1, no. 3, pp. 310-313, Mar. 2005. <https://doi.org/10.1002/sml.200400054>

[5] H. Quan, Y. Gao, and W. Wang, "Tungsten oxide-based visible light-driven photocatalysts: crystal and electronic structures and strategies for photocatalytic efficiency enhancement," *Inorg.*

*Chem. Front.*, vol. 7, no. 4, pp. 817-838, 2020. <https://doi.org/10.1039/C9QI01516G>

[6] W.-L. Dai, J. Ding, Q. Zhu, R. Gao, and X. Yang, "Tungsten containing materials as heterogeneous catalysts for green catalytic oxidation process," in *Catalysis*, vol. 28, 2016, pp. 1-27. <https://doi.org/10.1039/9781782626855-00001>

[7] Z. Hai, Z. Wei, C. Xue, H. Xu, and F. Verpoort, "Nanostructured tungsten oxide thin film devices: from optoelectronics and ionics to iontronics," *J. Mater. Chem. C*, vol. 7, no. 42, pp. 12968-12990, 2019. <https://doi.org/10.1039/C9TC04489B>

[8] N. C. Ou, X. Su, D. C. Bock, and L. McElwee-White, "Precursors for chemical vapor deposition of tungsten oxide and molybdenum oxide," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 421, p. 213459, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213459>

[9] P. Huang, M. M. Ali Kalyar, R. F. Webster, D. Cherns, and M. N. R. Ashfold, "Tungsten oxide nanorod growth by pulsed laser deposition: influence of substrate and process conditions," *Nanoscale*, vol. 6, no. 22, pp. 13586-13597, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4NR03977G>

[10] M. Fendrich, Y. Papat, M. Orlandi, A. Quaranta, and A. Miotello, "Pulsed laser deposition of nanostructured tungsten oxide films: A catalyst for water remediation with concentrated sunlight," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 119, no. May, p. 105237, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105237>

[11] M. Sadakane, K. Sasaki, H. Kunioku, B. Ohtani, W. Ueda, and R. Abe, "Preparation of nano-structured crystalline tungsten(vi) oxide and enhanced photocatalytic activity for



decomposition of organic compounds under visible light irradiation," *Chem. Commun.*, vol. 1, no. 48, p. 6552, 2008. <https://doi.org/10.1039/b815214d>

[12] S. Jeon and K. Yong, "Direct synthesis of W18O49 nanorods from W2N film by thermal annealing," *Nanotechnology*, vol. 18, no. 24, p. 245602, Jun. 2007. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/24/245602>

[13] H. G. Choi, Y. H. Jung, and D. K. Kim, "Solvothermal Synthesis of Tungsten Oxide Nanorod/Nanowire/Nanosheet," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 88, no. 6, pp. 1684-1686, Jun. 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00341.x>

[14] M. Juelsholt, T. Lindahl Christiansen, and K. M. Ø. Jensen, "Mechanisms for Tungsten Oxide Nanoparticle Formation in Solvothermal Synthesis: From Polyoxometalates to Crystalline Materials," *J. Phys. Chem. C*, vol. 123, no. 8, pp. 5110-5119, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b12395>

[15] L. Klein, *Handbook of Sol-Gel Science and Technology*. Cham: Springer International Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19454-7>

[16] C. Wang, Z.-X. Deng, and Y. Li, "The Synthesis of Nanocrystalline Anatase and Rutile Titania in Mixed Organic Media," *Inorg. Chem.*, vol. 40, no. 20, pp. 5210-5214, Sep. 2001. <https://doi.org/10.1021/ic0101679>

[17] M. Gotić and S. Musić, "Synthesis of Nanocrystalline Iron Oxide Particles in the Iron (III) Acetate/Alcohol/Acetic Acid System," *Eur. J. Inorg. Chem.*, vol. 2008, no. 6, pp. 966-973, Feb. 2008. <https://doi.org/10.1002/ejic.200700986>

[18] J. A. Hollingsworth, "Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots," in *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc0261>

[19] J. M. Clark et al., "High voltage sulphate cathodes  $\text{Li}_2\text{M}(\text{SO}_4)_2$  (M = Fe, Mn, Co): atomic-scale studies of lithium diffusion, surfaces and voltage trends," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 20, pp. 7446-7453, 2014. <https://doi.org/10.1039/C3TA15064J>

[20] H. Wang, Y. Shi, Z. Li, W. Zhang, and S. Yao, "Synthesis and electrochemical performance of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ /graphene," *Chem. Res. Chinese Univ.*, vol. 30, no. 4, pp. 650-655, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1007/s40242-014-4109-8>

[21] A. V. Radha, L. Lander, G. Rousse, J. M. Tarascon, and A. Navrotsky, "Thermodynamic stability and correlation with synthesis conditions, structure and phase transformations in orthorhombic and monoclinic  $\text{Li}_2\text{M}(\text{SO}_4)_2$  (M = Mn, Fe, Co, Ni) polymorphs," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 6, pp. 2601-2608, 2015. <https://doi.org/10.1039/C4TA05066E>

[22] C. Granqvist et al., "Recent advances in electrochromics for smart windows applications," *Sol. Energy*, vol. 63, no. 4, pp. 199-216, Oct. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00074-7)

[23] S. K. Deb, "Optical and photoelectric properties and colour centres in thin films of tungsten oxide," *Philos. Mag.*, vol. 27, no. 4, pp. 801-822, Apr. 1973. <https://doi.org/10.1080/14786437308227562>



[24] J. Y. Luo et al., "Ultraviolet-visible emission from three-dimensional  $\text{WO}_3-x$  nanowire networks," Appl. Phys. Lett., vol. 91, no. 9, p. 093124, Aug. 2007.  
<https://doi.org/10.1063/1.2776862>

[25] J. Wang, P. S. Lee, and J. Ma, "Synthesis, growth mechanism and room-temperature blue luminescence emission of uniform  $\text{WO}_3$  nanosheets with W as starting material," J. Cryst. Growth, vol. 311, no. 2, pp. 316-319, Jan. 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2008.11.016>

[26] K. Senthil and K. Yong, "Growth and characterization of stoichiometric tungsten oxide nanorods by thermal evaporation and subsequent annealing," Nanotechnology, vol. 18, no. 39, p. 395604, Oct. 2007.  
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/39/395604>

[27] B. A. De Angelis and M. Schiavello, "X-ray photoelectron spectroscopy study of nonstoichiometric tungsten oxides," J. Solid State Chem., vol. 21, no. 1, pp. 67-72, May 1977.  
[https://doi.org/10.1016/0022-4596\(77\)90145-1](https://doi.org/10.1016/0022-4596(77)90145-1)



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Calibración de toberas de flujo crítico por método volumétrico $C_d$

## *Calibration of critical flow nozzles by volumetric method $C_d$*

Jesús Eduardo Rivera López , Alejandro Díaz Martínez , Pedro Alejandro Tamayo Mesa, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes , Gabriela Esmeralda Orozco Durán, José Luis Arciniega Martínez 

Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco (ESIME. UP), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) Zacatenco

**Autor de correspondencia:** Alejandro Díaz Martínez, Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapotzalco (ESIME. UP), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) Zacatenco. E-mail: [adiazm1804@alumno.ipn.mx](mailto:adiazm1804@alumno.ipn.mx). ORCID: 0000-0002-3783-8056.

**Recibido:** 10 de Julio del 2021

**Aceptado:** 15 de Agosto del 2021

**Publicado:** 30 de Septiembre del 2021

**Resumen.** - En el presente trabajo, se tiene por objetivo mejorar la medición de flujo de gases por medio del uso de toberas de flujo crítico (Critical Flow Venturi Nozzles), para ello, se describe el procedimiento de calibración de dos toberas de flujo crítico con diámetros en la garganta de 0.022 y 0.088 pulgadas. El procedimiento desarrollado tiene como base las recomendaciones que hace la Norma ISO 9300 para la estimación y cálculo del coeficiente de descarga “ $C_d$ ” de las toberas de flujo crítico. La calibración se realizó en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) con el uso de los patrones nacionales de flujo de gas. Los patrones utilizados o probadores son del tipo: Pistón y Campana, con un rango de medición de 0.05 a 50 L/min, y de 50 a 2840 L/min, respectivamente. El método utilizado para la calibración de las toberas fue mediante la comparación directa con el patrón.

**Palabras clave.** - Flujo crítico; Calibración; Microtobera; Estimación de la incertidumbre; Patrones.

**Abstract.** - In the present work, the objective is to improve the measurement of gas flow through the use of critical flow nozzles (Critical Flow Venturi Nozzles), for this, the calibration procedure of two critical flow nozzles with diameters in the throat of 0.022 and 0.088 inches. The procedure developed is based on the recommendations made by the ISO 9300 Standard for the estimation and calculation of the discharge coefficient "Cd" of the critical flow nozzles. The calibration was carried out at the National Metrology Center (CENAM) with the use of national gas flow standards. The standards used or testers are of the type: Piston and Bell, with a measurement range of 0.05 to 50 L / min, and from 50 to 2840 L / min, respectively. The method used to calibrate the nozzles was by direct comparison with the standard.

**Keywords.** – Critical flow; Calibration; Micro nozzle; Estimation of uncertainty; Standards.



## 1.- Introducción

Gases como el hidrógeno, helio, metano, gas natural y otros, juegan un importante papel en la sustitución de los hidrocarburos, los cuales al ser recursos energéticos fósiles se consideran no renovables y están sujetos al agotamiento, para determinar esto se utiliza el indicador de agotamiento de las reservas de hidrocarburos, conocido técnicamente como el *coeficiente de reservas totales-producción* [1], cuyo propósito es medir el número de años que podrían rendir las reservas de hidrocarburos estimadas de un país de acuerdo al nivel de explotación de un año dado. Además, el gas natural resulta el combustible más económico en términos de energía entregada en la caldera, lo que implica que el costo de generación de vapor, donde el combustible incide más del 80% se reduce utilizando gas [1].

El gas natural produce una mejor combustión, gracias a que, al estar en estado molecular, sus componentes reaccionan de forma más completa con las moléculas de oxígeno. Se produce una combustión más eficiente porque requiere menos exceso de aire en el quemador, lo que, a su vez, produce menos  $CO_2$  y otras partículas contaminantes. Lo anterior sucede debido a que los quemadores de gas natural no requieren de vapor, como sí lo requieren los combustibles líquidos y esto no solo reduce el costo de la demanda de vapor o electricidad para comprimir el aire, sino que resulta en una ventaja para el cumplimiento de normas sobre los límites máximos permisibles de emisiones de gas invernadero y partículas en suspensión en el ambiente.

Tenemos el ejemplo de la Comisión Federal de Electricidad en donde a través de la reforma energética espera disminuir en un 90% el uso de hidrocarburos mediante el impulso del uso del gas natural en centrales de generación donde

establecen también que es tres veces más barato y 68% menos contaminante [2].

Por esta razón, la medición de flujo de gases está cobrando gran relevancia a nivel mundial, ya que hoy en día, se pierden millones de dólares por incertidumbre en la medición de flujo de gases con dispositivos subsónicos ( $Ma \leq 0,3$ ) [3]. Los instrumentos subsónicos que suelen utilizarse para la medición de gases son el tubo Venturi, rotámetro, molinete, placa de orificio, etc.

Estos dispositivos cuentan con un rango de incertidumbre de 0,3 al 3% [4], con esta incertidumbre, se tiene una baja calidad en la medición. Por esta razón, laboratorios de metrología como el NIST (E.U), PTB (Alemania), KRISS (Corea), INMETRO (Brasil), CENAM (México), etc., han desarrollado investigaciones en elementos de medición de flujo crítico ( $Ma= 1$ ). Estos medidores son conocidos como toberas y micro toberas (critical flow nozzles), donde el rango de incertidumbre de estos dispositivos oscila entre el 0,03 y 0,3% [4]. Existe una ventaja notable de los medidores de flujo crítico sobre los medidores subsónicos los cual los hace ser elementos óptimos en la medición de flujo de gas, así como también pueden ser utilizados como patrón secundario en la calibración de medidores subsónicos.

Existen dos maneras principales para calibrar toberas de flujo crítico, una de ellas es por medio de modelos numéricos, estos se componen de ecuaciones que se expresan como ecuaciones diferenciales parciales a las cuales describen la evolución futura de las diferentes variables relevantes en función de los valores de las distintas variables en el presente. En el caso particular de la NORMA ISO 9300 y su modelo numérico, el coeficiente de descarga  $C_d$  el cual depende principalmente de la forma de la tobera





de flujo crítico y del régimen de flujo, se determina mediante la siguiente ecuación  $C_d = a - bRe^{-n}$ , donde los coeficientes a, b y n para el caso de una garganta de tipo toroidal en la tobera tienen los siguientes valores  $a = 0,9959$ ,  $b = 2,720$  y  $n = +0,5$ , con un intervalo del régimen de flujo  $2,1 \times 10^4 \leq Re \leq 3,2 \times 10^7$  [5], en esta ecuación la incertidumbre representa un 0,3% en un nivel de confianza del 95% para la tobera con garganta de tipo toroidal.

Algunos métodos de calibración indirectos se basan en la ecuación de estado  $\rho = P/RT$ , donde la masa es  $m = \rho V$  y  $\rho$  es la densidad y  $V$  es el volumen de la sustancia respectivamente. Para ambos métodos se hace la suposición de que se conoce el volumen del recipiente que recogerá el gas [6].

Otra forma de calibrar es la experimental, en la cual existen diferentes técnicas de calibración como son las del tipo gravimétrico, volumétrico y los del tipo presión-volumen-temperatura-tiempo (PVT-t). Las condiciones establecidas para realizar estas pruebas incluyen el aire a presión atmosférica y temperatura ambiente. Los medidores del tipo volumétrico incluyen un pistón o campana de calibración. La calibración volumétrica consiste en comparar la medida de un patrón de referencia con la medida del equipo. El Centro Nacional de Metrología (CENAM) cuenta con los patrones primarios de medición de flujo de gas (pistón y campana de calibración), los cuales tienen los rangos de medición de 0,05 a 50 L/min, y de 50 a 2840 L/min, respectivamente. Por lo anterior el objetivo de este trabajo es establecer patrones secundarios de medición de flujos de gases confiables utilizando microtoberas de flujo crítico, con una incertidumbre baja y costeables.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Principio de funcionamiento del flujo crítico.

Cuando un flujo compresible pasa por una sección convergente-divergente, la velocidad del gas alcanza un valor máximo en el punto de mínima área (garganta de la tobera), y la velocidad del fluido en la garganta se incrementa en función de una diferencia de presiones corriente arriba y corriente abajo de la misma. El valor límite de esta velocidad es la velocidad del sonido o condición crítica [7]. Bajo esta condición se dice que la tobera está bloqueada o estrangulada, dado que el bloqueo es una restricción física provocada por el flujo crítico, es donde se obtiene la máxima cantidad de flujo másico que puede circular por la garganta de la tobera.

En un flujo unidimensional con viscosidad despreciable, teóricamente se puede utilizar una relación para predecir el comportamiento metrológico de la tobera de flujo crítico, y usando esta aproximación, se puede demostrar que un flujo “ideal” a través de una tobera es gobernada por la siguiente relación [5].

$$\dot{m}_{ideal} = \frac{P_o A^* C^*}{\sqrt{R_{gas} T_o}} \quad (1)$$

Dónde:  $P_o$ - es la presión de estancamiento;  $T_o$  - es la temperatura de estancamiento;  $C^*$  - es el factor de flujo crítico;  $A^*$  - es el área de la garganta de la tobera, y  $R_{gas}$  - es la constante específica del gas. Este modelo analítico asume que el flujo a través de la tobera presenta características de flujo crítico ( $Ma = 1$ ). Este modelo analítico asume que el flujo a través de la tobera presenta características de flujo crítico ( $Ma = 1$ ). De acuerdo al CODATA 2018 la constante universal de los gases es igual a  $R_u =$



8,314 462 618 [J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]. La masa molecular del aire seco es igual a 28,96546 kg/kmol [7].

Si se requiere una mayor precisión en el cálculo del flujo másico, se recomienda calibrar experimentalmente la tobera, donde el coeficiente de descarga de la tobera es un suplemento a las consideraciones impuestas al flujo ideal, ecuación (1).

El coeficiente de descarga  $C_d$  [5] es definido como:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{real}}{\dot{m}_{ideal}} \quad (2)$$

El coeficiente de descarga es siempre menor que la unidad, esta condición asume que el  $C_d$  es calculado usando el diámetro real de la garganta y el flujo másico no es afectado por el fenómeno de relajación vibracional [8]. Para una geometría de una tobera dada, el coeficiente de descarga varía como una función de la relación del flujo que pasa a través de ésta, y comúnmente, esta función se expresa en términos del número de Reynolds definido como [5]:

$$Re = \frac{4\dot{m}_{real}}{\pi \cdot d \cdot \mu_0} \quad (3)$$

$$\mu_0 = \left( \frac{145,8T_0^{1,5}}{110,4+T_0} \right) \quad (4)$$

Dónde:  $\mu_0$  - está dada en Pa·s y  $T_0$  en Kelvin: (Wright, 1998).

## 2.2 Cálculo del coeficiente de descarga $C_d$ :

La metodología proporcionada por la norma ISO-9300, para calcular el flujo másico a través de la tobera de flujo crítico cuenta con las siguientes restricciones:

- Flujo isentrópico.
- Flujo unidimensional
- Viscosidad despreciable

Con estas restricciones se complementan las ecuaciones (1, 2 y 3) con las siguientes expresiones:

El coeficiente de flujo crítico  $C^*$  engloba los cambios termodinámicos en el flujo isentrópico de las condiciones de estancamiento en la garganta de la tobera. En aplicaciones con gases reales  $C^*$  depende de la presión, temperatura y composición química del gas [8].

$$C^* = 0,68309 + 1,42025 \times 10^{-5} T_0 - 2,80046 \times 10^{-5} T_0^2 + 3,47447 \times 10^{-5} P_0 - 1,80997 \times 10^{-7} P_0 T_0 + 2,46278 \times 10^{-10} P_0 T_0^2 \quad (5)$$

Dónde:  $P_0$ - está dada en kPa,  $T_0$  - en Kelvin y  $C^*$  es el factor de flujo crítico de Johnson- es un factor adimensional [8],[10].

$$Ma = \frac{4\dot{m}}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho \cdot \sqrt{\gamma \cdot R_{gas} \cdot T_0}} \quad (6)$$

El flujo esta dado en kg/s,  $d$  en metros,  $\rho$  en kg/m<sup>3</sup>,  $\gamma$  es un factor adimensional,  $R_{gas}$  - se expresa en J/kg·K,  $T_0$  - en Kelvin.

La relación de los calores específicos  $g$  se puede determinar por [8],[10]:

$$\gamma = 1,39263 + 7,915 \times 10^{-5} T_0 - 1,822 \times 10^{-7} T_0^2 + \left( \frac{20,2}{T_0} \right)^{2,36} \left( \frac{P_0}{101,325} \right)^{1,015} \quad (7)$$

Donde,  $P_0$  está dado en kPa y  $T_0$  - en Kelvin.

Finalmente, el coeficiente de descarga  $C_d$  [4], se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{4 \cdot \dot{m} \cdot \sqrt{R_{gas} \cdot T_0}}{\pi \cdot d^2 \cdot C^* \cdot P_0} \quad (8)$$

## 2.3 Instrumentos, equipo de calibración y estimación de la incertidumbre.

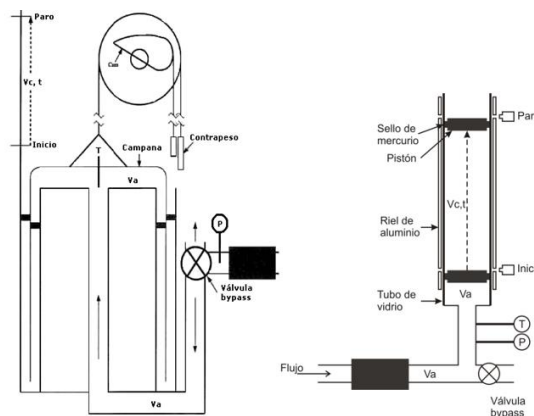


Durante la calibración, es necesario medir presión y temperatura de estancamiento a la entrada de la tobera, así como también medir presión y temperatura en el patrón de calibración (salida de tobera). La medición de la presión tanto en la tobera como en el patrón se realizó empleando transductores de presión, los cuales tienen un rango de presión absoluta de 0 a 1000 kPa, y la medición de temperatura se realizó utilizando termocoples, y su rango de medición es de 0 a 50 °C con una resolución de 0,001 °C. La instalación de las toberas en los patrones se realizó empleando dos tubos conectores. En el tubo corriente arriba de la tobera se instala el transductor de presión y el termocople para la medición de las condiciones de estancamiento, y en el tubo corriente abajo de la misma es conectada la alimentación del patrón. A este montaje se le instala una válvula reguladora de presión corriente arriba de la tobera, para el ajuste de la presión de estancamiento.

El funcionamiento de los patrones está basado en la medición del tiempo, para recolectar un volumen de gas conocido [10]. El pistón de calibración consta de un tubo de vidrio de precisión por el cual se desplaza un embolo de diámetro menor al tubo de vidrio, una ranura en la periferia del embolo retiene mercurio, el cual forma un ligero sello entre el embolo y el tubo, este sistema es una terminal dinámica ya que el fluido colectado inicia y termina el movimiento del pistón, el rango de este patrón es de 0,05 a 50 L/min.

La campana de calibración consiste en un tanque cilíndrico abierto en la parte superior y un fluido, los cuales forman un sistema anular que es llenado en su alrededor con vapor de aceite de baja presión que sirve como sello mecánico, un tanque cilíndrico abierto en la parte inferior y con un domo en la parte superior (campana) es insertado en el aceite del tanque inferior, el peso de la campana necesita ser balanceado por un

contrapeso, este permitirá subir o bajar la campana con una pequeña diferencia de presiones ( $P < 1$  kPa); esto permite la colección y medición del volumen de gas conocido, ver figura 1.



**Figura 1** Esquema del patrón nacional de flujo Campana (izquierda) y pistón (derecha),  $V_a$  volumen de entrada,  $V_c$  volumen colectado, T y P localización de transductores de presión y temperatura.

El flujo que desplaza al pistón o campana es calculado por la medición de los pulsos y el tiempo de recolección, la ecuación que permite calcular el flujo a través de los patrones es la siguiente:

$$Q = \frac{C \cdot 60}{K \cdot t} \quad (9)$$

Donde  $Q$  es el flujo volumétrico,  $K$  es una constante igual a 543,2 pulsos / L para el patrón de campana y 13655,8 pulsos / L para el pistón,  $C$  es el número de pulsos y  $t$  es el tiempo de recolección. El flujo másico que circula por la tobera se calcula al multiplicar la ecuación nueve por la densidad del gas en la campana o pistón. En la medición de la densidad del aire, la corrección por flotabilidad en el aire húmedo es a menudo la mayor componente de incertidumbre [2]. Además, que la humedad en el aire provoca desviaciones en el comportamiento ideal de las propiedades termodinámicas del flujo [7], por lo que, para utilizar las ecuaciones antes planteadas,



la calibración se realizará bajo las condiciones de flujo  $HR \approx 0$ , y por tanto el cálculo de  $\rho$ ,  $\gamma$  y  $*C$ , se calcularán en condiciones de aire seco y por tal motivo las ecuaciones 5, 7 y 10 son válidas. La densidad se calcula por [10]:

$$\rho = \frac{1}{1,23838 + 287,04 \frac{T_P}{P_P} - 3012,2T^{-1,334}} + \frac{1}{-7,3049 \times 10^{-4} \frac{P_P}{T_P} + 2,5304 \times 10^{-2} \frac{P_P}{T_P^{1,25}}} \quad (10)$$

Donde la densidad está dada en  $kg/m^3$ ,  $P_P$  tiene unidades de kPa y  $T_P$  en Kelvin.

Finalmente, en este trabajo se calculará la estimación de la incertidumbre para cada una de las toberas calibradas, para ello propone usar la ley de propagación de la incertidumbre [10], y el procedimiento se describe a continuación:

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{xi}^2 \quad (11)$$

Si  $f = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$  entonces  $u(f)$  es dada por la ecuación número 11. Donde  $N$  es el número de contribuciones y  $x_i$  es cada una de las contribuciones de incertidumbre, sustituyendo el  $C_d$  de la ecuación 8 en la ecuación 11 se tiene:

$$u_{Cd} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial C_d}{\partial x_i} \right)^2 u_{xi}^2} \quad (12)$$

Las fuentes de incertidumbre son tomadas de la ecuación 8 y son:

$$x_1 = T_0, \quad x_2 = P_0 \quad \text{y} \quad x_3 = \dot{m}$$

Sustituyendo  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  en la ecuación 12 se tiene:

$$u_{Cd} = \sqrt{\left( \frac{\partial C_d}{\partial T_0} \right)^2 u_{T_0}^2 + \left( \frac{\partial C_d}{\partial P_0} \right)^2 u_{P_0}^2 + \left( \frac{\partial C_d}{\partial \dot{m}} \right)^2 u_{\dot{m}}^2 + (u_{Cd})^2} \quad (13)$$

Esta ecuación es válida ya que se desprecian las contribuciones por correlación entre variables. Donde  $u_{T_0}$  es determinada por:

$$u_{T_0} = u_B(T_0) \quad (14)$$

Donde  $u_B$  es la incertidumbre del tipo B y es obtenida por la resolución del instrumento. Esta ecuación es una distribución del tipo rectangular [14].

$$u_B(T_0) = \frac{\text{resolución}}{\sqrt{12}} \quad (15)$$

El cálculo de  $u_{P_0}$  se efectúa de la misma forma que el de  $u_{T_0}$ , por lo cual la ecuación 15 es aplicada para el cálculo de esta incertidumbre [10].

La incertidumbre del flujo  $u_{\dot{m}}$  es estimada de la ecuación 9, a esta ecuación se le agrega la densidad del fluido para obtener el flujo másico de la tobera:

$$\dot{m} = \frac{C \cdot 60}{K \cdot t} \rho \quad (16)$$

Las fuentes de incertidumbre de esta ecuación son los pulsos ( $C$ ), la constante del patrón ( $K$ ), el tiempo ( $t$ ) y la densidad ( $\rho$ ). Sustituyendo las fuentes de incertidumbre en la ecuación 11 se tiene:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{\left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial C} \right)^2 u_C^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial K} \right)^2 u_K^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \right)^2 u_t^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} \right)^2 u_{\rho}^2} \quad (17)$$



Los coeficientes de sensibilidad son establecidos de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial C} = \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial C} \right) \left( \frac{C}{\dot{m}} \right) = \left( \frac{\rho}{Kt} \right) \left( \frac{CKt}{C\rho} \right) = 1 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} = \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho} \right) \left( \frac{\rho}{\dot{m}} \right) = \left( \frac{C}{Kt} \right) \left( \frac{\rho Kt}{C\rho} \right) = 1 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial K} = \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial K} \right) \left( \frac{K}{\dot{m}} \right) = \left( -\frac{C\rho}{K^2 t} \right) \left( \frac{K^2 t}{C\rho} \right) = -1 \quad (20)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} \right) \left( \frac{t}{\dot{m}} \right) = \left( -\frac{C\rho}{Kt^2} \right) \left( \frac{Kt^2}{C\rho} \right) = -1 \quad (21)$$

Las incertidumbres de  $u_C$ ,  $u_t$ ,  $u_\rho$  y  $u_K$  son establecidas por certificado de calibración de los instrumentos de medición, por la estabilidad en la medición y por repetibilidad. El cálculo de la incertidumbre estándar de los pulsos y del tiempo serán calculadas de los datos medidos durante la calibración.

Al sustituir los valores de los coeficientes de sensibilidad y los valores de  $u_C$ ,  $u_t$ ,  $u_K$  y  $u_\rho$  en la ecuación 17, se puede estimar el valor de la incertidumbre del flujo másico. Esta incertidumbre es proporcionada por el laboratorio de flujo y volumen del Centro Nacional de Metrología (CENAM) y es igual a:

$$u_m = 0,15\%$$

El cálculo de la incertidumbre relativa por repetibilidad en la medición del coeficiente de descarga  $u_{cd}$ , es calculada con la desviación estándar “s” del  $C_d$  dividida entre la raíz del número de mediciones  $u_{cd} = s / \sqrt{N}$ , esta es una incertidumbre tipo A.

Los coeficientes de sensibilidad de la ecuación 13 son igual a:

$$\frac{\partial C_d}{\partial T_0} = 0,5, \frac{\partial C_d}{\partial P_0} = 1,0 \text{ y } \frac{\partial C_d}{\partial \dot{m}} = 1,0$$

Finalmente, haciendo los cálculos correspondientes se estima la incertidumbre del  $C_d$  para cada punto de calibración de las toberas. El cálculo se efectúa con una hoja de cálculo y los resultados se muestran en las tablas correspondientes.

### 3. Metodología

#### 3.1. Procedimiento de calibración.

Para calibrar la tobera de flujo crítico con diámetro de garganta de 0,56 mm se utilizó el pistón de calibración, debido a que el rango de flujo másico de esta tobera se ajusta al intervalo de medición de este patrón. Además, como la tobera de 2,24 mm tiene una mayor capacidad de flujo, para esta tobera, la calibración se efectuó con la campana. Por otro lado, el procedimiento de calibración para ambas toberas es el mismo, ya que los patrones de calibración funcionan por el principio volumétrico [9].

Una válvula bypass es cerrada para iniciar la colección del gas en los patrones, el pistón o campana inicia su elevación (en virtud de un ligero exceso de presión  $P \approx 0,5$  kPa), este desplazamiento es medido por medio de un enconder que mide el desplazamiento en forma de pulsos, durante este proceso se registra la presión y temperatura del flujo en el patrón, siguiendo este procedimiento se repite un mínimo de tres veces por cada punto de calibración.

Por otro lado, la calibración se desarrolló en el Centro Nacional de Metrología (CENAM), bajo las siguientes condiciones ambientales controladas;  $T_{amb} = 20,7$  °C,  $P_{amb} = 80365$  Pa y  $HR = 38,26\%$ . Los puntos propuestos para la calibración en ambas toberas es el mostrado en la Tabla 1, en donde además se muestran las relaciones de presiones críticas para cada punto de calibración.



**Tabla 1.-** Puntos de calibración para ambas toberas,  $P_b = 80365$  Pa.

| $(P_0)$     | $(P_0)$     | $(P_0)$     | $(P_0)$     | $(P_0)$     |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 200 kPa     | 300 kPa     | 400 kPa     | 500 kPa     | 600 kPa     |
| $(P_b/P_0)$ | $(P_b/P_0)$ | $(P_b/P_0)$ | $(P_b/P_0)$ | $(P_b/P_0)$ |
| 0.4         | 0.26        | 0.20        | 0.16        | 0.13        |

Siguiendo el procedimiento anterior para cada punto de calibración se muestra en las Tablas 2 y 3 los datos promedios medidos de las tres repeticiones realizadas para cada punto de calibración de ambas toberas de flujo crítico.

**Tabla 2.-** Datos experimentales promedios medidos.

| Tobera $d = 0,022$ pulg (0,56 mm) |           |                |           |                 |         |
|-----------------------------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|---------|
| $P_o$<br>(kPa)                    | $T_o$ (K) | $P_p$<br>(kPa) | $T_p$ (K) | $C$<br>(pulsos) | $t$ (s) |
| 200,83                            | 294,21    | 80,78          | 293,93    | 6018,00         | 40,77   |
| 300,40                            | 294,21    | 80,79          | 293,94    | 60313,50        | 27,14   |
| 400,67                            | 294,18    | 80,81          | 293,96    | 60637,50        | 20,39   |
| 500,09                            | 294,55    | 80,82          | 294,03    | 60739,67        | 16,33   |
| 601,25                            | 294,59    | 80,83          | 294,02    | 60741,83        | 13,62   |

**Tabla 3.-** Datos experimentales promedios medidos.

| Tobera $d = 0,088$ pulg (2,24 mm) |           |                |           |                 |         |
|-----------------------------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|---------|
| $P_o$<br>(kPa)                    | $T_o$ (K) | $P_p$<br>(kPa) | $T_p$ (K) | $C$<br>(pulsos) | $t$ (s) |
| 200,48                            | 293,04    | 80,91          | 293,17    | 60217,33        | 59,51   |
| 300,49                            | 293,17    | 80,92          | 293,16    | 60386,33        | 39,58   |
| 400,46                            | 293,29    | 80,93          | 293,16    | 60460,50        | 29,67   |
| 500,44                            | 293,39    | 80,94          | 293,17    | 60607,67        | 23,85   |
| 600,83                            | 293,36    | 80,95          | 293,20    | 60238,50        | 19,66   |

Utilizando los datos experimentales de las Tablas 2 y 3, así como también las ecuaciones 5, 8, 9 y 10 se calcula el flujo volumétrico  $Q$ , densidad  $\rho$ , flujo másico  $\dot{m}$ , factor de flujo crítico  $C^*$  y el coeficiente de descarga  $C_d$ . Además, siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3, se estima la incertidumbre en la medición (Tablas 4 y 5).

**Tabla 4.-** Resultados de la calibración.

| Tobera $d = 0,022$ pulg (0,56 mm) |                                |                     |       |       |              |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------|-------|--------------|
| $Q$<br>(L/min)                    | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\dot{m}$<br>(kg/s) | $C^*$ | $C_d$ | $uCd$<br>(%) |
| 6,49                              | 0,96                           | 0,00010             | 0,69  | 0,89  | 0,26         |
| 9,76                              | 0,96                           | 0,00016             | 0,69  | 0,89  | 0,21         |
| 13,07                             | 0,96                           | 0,00021             | 0,69  | 0,90  | 0,20         |
| 16,34                             | 0,96                           | 0,00026             | 0,69  | 0,90  | 0,19         |
| 19,60                             | 0,96                           | 0,00031             | 0,69  | 0,90  | 0,20         |

**Tabla 5.-** Resultados de la calibración.

| Tobera $d = 0,088$ pulg (2,24 mm) |                                |                     |       |       |              |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------|-------|--------------|
| $Q$<br>(L/min)                    | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\dot{m}$<br>(kg/s) | $C^*$ | $C_d$ | $uCd$<br>(%) |
| 111,77                            | 0,96                           | 0,00179             | 0,69  | 0,96  | 0,31         |
| 168,54                            | 0,96                           | 0,00270             | 0,69  | 0,97  | 0,27         |
| 225,08                            | 0,96                           | 0,00361             | 0,69  | 0,97  | 0,27         |
| 280,73                            | 0,96                           | 0,00450             | 0,69  | 0,97  | 0,27         |
| 338,38                            | 0,6596                         | 0,00543             | 0,69  | 0,97  | 0,27         |

Por medio de los números adimensionales de Reynolds ( $Re$ ) y Mach ( $Ma$ ), se podrán graficar los resultados de la calibración, para calcular estos números adimensionales, se utilizan las ecuaciones: 3, 4, 6 y 7. Los resultados se muestran en las Tablas 6 y 7.

**Tabla 6.-** Cálculo de  $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $Re$  y  $Ma$ .

| Tobera $d = 0,022$ pulg (0,56 mm) |              |          |         |      |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------|------|
| $\dot{m}$ (kg/s)                  | $\mu$ (Pa·s) | $\Gamma$ | $Re$    | $Ma$ |
| 0,00010                           | 0,000127     | 1,42     | 1853,06 | 1,28 |
| 0,00016                           | 0,000127     | 1,42     | 2789,69 | 1,92 |
| 0,00021                           | 0,000127     | 1,42     | 3735,07 | 2,57 |
| 0,00026                           | 0,000127     | 1,42     | 4666,57 | 3,21 |
| 0,00031                           | 0,000127     | 1,42     | 5596,66 | 3,85 |

**Tabla 7.-** Cálculo de  $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $Re$  y  $Ma$ .

| Tobera $d = 0,088$ pulg (2,24 mm) |              |          |         |      |
|-----------------------------------|--------------|----------|---------|------|
| $\dot{m}$ (kg/s)                  | $\mu$ (Pa·s) | $\Gamma$ | $Re$    | $Ma$ |
| 0,0018                            | 0,000127     | 1,40     | 8042,42 | 1,38 |
| 0,0027                            | 0,000127     | 1,41     | 1212,95 | 2,08 |
| 0,0036                            | 0,000127     | 1,41     | 1619,18 | 2,77 |
| 0,0045                            | 0,000127     | 1,41     | 2019,60 | 3,46 |
| 0,0054                            | 0,000127     | 1,41     | 2433,66 | 4,16 |



Teniendo como base los resultados de las Tablas 6 y 7, se procede a graficar el comportamiento del coeficiente de descarga en función del  $Re$  y  $Ma$  como se observa en las gráficas de las Figuras 2, 3 y 4.

#### 4. Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos, los coeficientes de descarga de ambas toberas son incrementados en función del aumento del número de Reynolds (Figuras 2 y 3). Lo anterior tiene como consecuencia que el mejor punto de calibración para ambas toberas ocurra en régimen turbulento ( $Re = 4666,57$ ;  $C_d = 0,97$ ) y ( $Re = 20190,60$ ;  $C_d = 0,90$ ) respectivamente. Con esto se puede inferir que las fuerzas viscosas en la garganta de las toberas tuvieron una disminución considerable y, por tanto, la estrangulación en la garganta es mínima para estos valores del número de Reynolds, y, por tanto, esta condición del flujo contribuyó en los excelentes valores de los coeficientes.

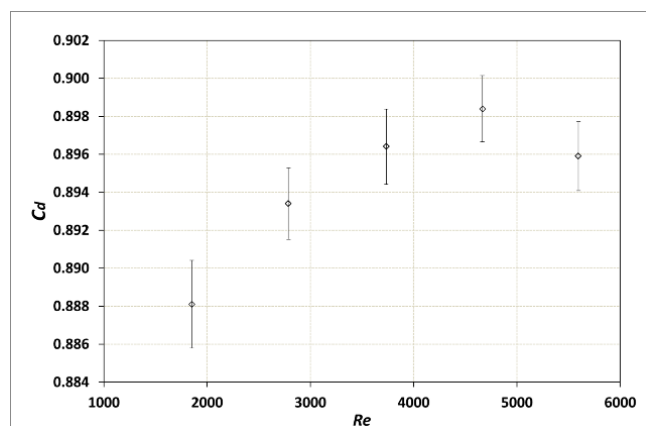


Figura 2. Tobera  $d = 0,56$  mm, variación del  $C_d$  vs  $Re$ , las barras de error muestran la incertidumbre para cada punto de calibración.

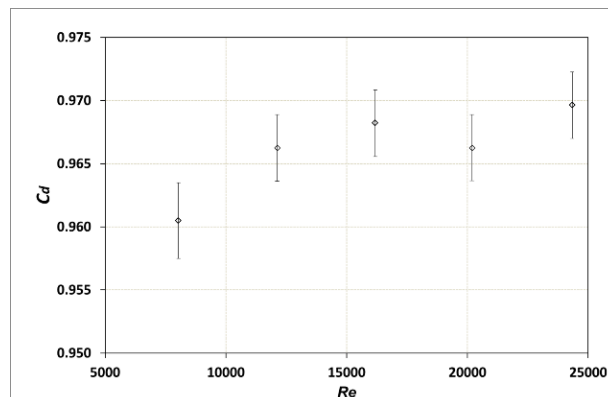


Figura 3. Tobera  $d = 2,24$  mm, variación del  $C_d$  vs  $Re$ , las barras de error muestran la incertidumbre para cada punto de calibración.

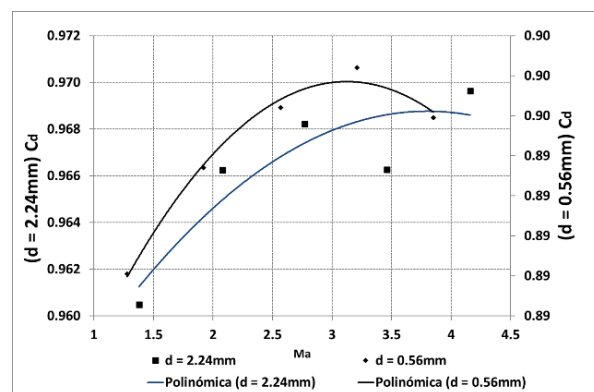


Figura 4. Variación del  $C_d$  vs  $Ma$  en ambas toberas de flujo crítico.

Por otro lado, en la Figura 4, se observan dos valores límite en donde la estrangulación de las toberas ya no es predominante en la calibración ( $Ma = 3,21$  y  $Ma = 3,41$ ), se hace esta presunción, debido a que los coeficientes de descarga presentan reducciones para estas condiciones del flujo. Esto se puede observar de mejor forma con las líneas de tendencia de los puntos de calibración, en donde el cambio de la pendiente en ambas curvas muestra el decremento del  $C_d$ . Esta reducción en el coeficiente se puede explicar por medio de las condiciones de flujo en la tobera, ya que, debido a la expansión del flujo en el difusor, la velocidad aumenta hasta la condición de flujo supersónico. Teniendo este flujo, se genera una onda de choque en el difusor, la cual tiene efectos de bloqueo en la garganta, lo



que provoca que el flujo sea frenado y, por tanto, sea disminuido el  $C_d$ .

Además, es importante resaltar que el diámetro de garganta tiene un papel importante en la calibración de la tobera, ya que como se observa en los resultados, para la tobera con  $d = 0,56$  mm se tiene un  $C_d = 0,90$  y para la tobera con  $d = 2,24$  mm se tiene un  $C_d = 0,97$  (Tablas 4 y 5), lo que indica que la calibración mejora con el aumento del diámetro de garganta.

Finalmente, la estimación de la incertidumbre en la calibración de las toberas, arroja valores aceptables, ya que solamente en un punto de calibración (0,31%,  $d = 2,24$ mm) se encuentra fuera del intervalo de confiabilidad que se indica para este tipo de dispositivos de medición [5].

#### 4. Conclusiones

De lo anterior se puede concluir que:

1. La norma ISO9300 es una guía importante en la calibración de las toberas de flujo crítico.
2. La calibración de las toberas fue satisfactoria, ya que en la literatura especializada se reportan valores muy próximos del coeficiente de descarga [4-0].
3. La incertidumbre de estas dos toberas, se encuentra dentro del intervalo de confiabilidad aceptado para estos dispositivos [5]. Sin embargo, por ser una incertidumbre alta (Tablas 4 y 5), se recomienda utilizar estas toberas solo como instrumentos terciarios de medición.
4. En régimen turbulento, el coeficiente de descarga tiene un comportamiento aceptable, y por lo tanto se recomienda la medición y calibración para esta condición del flujo.
5. Se debe evitar el régimen laminar en este tipo de dispositivos, ya que afecta la estrangulación de la tobera y por consiguiente la calibración.

6. El bloqueo en la garganta de la tobera, impide seguir aumentando los puntos de calibración, ya que el  $C_d$  comienza a disminuir.

7. El coeficiente de descarga mejora al aumentar el diámetro de garganta de la tobera.

#### NOMENCLATURA.

|              |   |
|--------------|---|
| $A$          | área                                      |
| $C^*$        | factor de flujo crítico de Johnson        |
| $C_d$        | coeficiente de descarga de la tobera      |
| $d$          | diámetro en la garganta de la tobera      |
| $Y$          | relación de calores específicos           |
| $m_{ideal}$  | flujo másico ideal                        |
| $m_{actual}$ | flujo másico actual                       |
| $u_{Cd}$     | incertidumbre del coeficiente de descarga |
| $Ma$         | número de Mach                            |
| $P_p$        | presión del patrón                        |
| $P_{amb}$    | presión ambiente                          |
| $R_{gas}$    | constante de los gases                    |
| $Re$         | número de Reynolds                        |
| $T_p$        | temperatura del patrón                    |
| $T_o$        | temperatura de estancamiento              |
| $T_{amb}$    | temperatura ambiente                      |
| $\rho$       | densidad del aire                         |
| $\mu_o$      | viscosidad del fluido                     |
| $C$          | número de pulsos del encoder              |
| $t$          | tiempo de recolección del gas             |
| $K$          | constante del patrón nacional             |
| $HR$         | humedad relativa del fluido               |

#### SUBÍNDICES.

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| $o$ | condiciones de estancamiento |
| $*$ | condiciones críticas         |

#### 5. Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen las facilidades prestadas al Centro Nacional de Metrología (CENAM) y en especial al Laboratorio de Flujo y Volumen por haber





permitido la realización de las pruebas experimentales.

## 6. Reconocimiento de autoría

*Jesús Eduardo Rivera López*; Conceptualización y metodología seguida en el desarrollo del trabajo. *Alejandro Díaz Martínez*; Análisis e investigación de los factores preponderantes de las corridas experimentales. *Pedro Alejandro Tamayo Meza*; Redacción y borrador del trabajo escrito. *Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes*; Desarrollo de las corridas experimentales. *Gabriela Esmeralda Orozco Duran*; Estimación y cálculo de la incertidumbre experimental. *José Luis Arciniega Martínez*; Diseño y preparación de la instalación experimental.

## Referencias

- [1] V, Chalco, V, “Beneficios de la conversión a gas natural en calderas de vapor”. Recuperado de <http://www.unmsm.edu.pe/cedit/linked/analisis%20de%20cambio%20de%20combustible.pdf>, 2005.
- [2] Secretaría de Energía, "PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN

- NACIONAL DE DESARROLLO 2019-2024", 2020.
- [3] González Escamilla, "Dinámica de gases aplicada a las toberas", Licenciatura, Universidad Autónoma de Nuevo León, 1999.
- [4] J. A. Cruz Maya, "Analytical and Numerical Characterization of the Discharge Coefficient of a Sonic Venturi Nozzle.", Doctorado, Instituto Politécnico Nacional, 2014.
- [5] Norma ISO 9300 "Critical measurement of gas flow by means of flow Venturi nozzles". 1990.
- [6] V.I, Chesnokov y B.A. Ipolitov, "Estimating the Error Component Associated with the Selection of a Gas Flow Model in Critical Nozzles". Meas Tech. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1182-7>
- [7] R.W. Fox, A.T. McDonald, "Introduction to Fluid Mechanics". 8th. Edition, Wiley and Sons, USA. 2011.
- [8] J.D. Wright, "The Long-Term Calibration Stability of Critical Flow Nozzles and Laminar Flowmeters," Proceedings of the 1998 NCSL Workshop and Symposium, Albuquerque, NM, NCSL, pp. 443–462. 1998.
- [9] A Picard, R S Davis, M Gläser and K Fujii, "Revised formula for the density of moist air". CIPM. 2007.
- [10] A.S. Wolfgang, R.J. Lazos Martínez, "Guía para la estimación de la incertidumbre". CENAM, 2004.

Derechos de Autor (c) 2022 Jesús Eduardo Rivera López, Alejandro Díaz Martínez, Pedro Alejandro Tamayo Mesa, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes, Gabriela Esmeralda Orozco Durán, José Luis Arciniega Martínez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)