

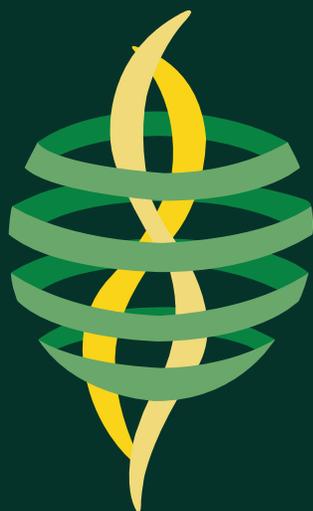
RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TITULO No. 04-2018-070614032000-203

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 2

ISSN: 2594-1925



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

# 2021

Abril-Junio



# Separación de metales en soluciones acuosas mediante membranas poliméricas con extractantes novedosos

## *Separation of metals from aqueous solutions using polymeric membranes with novel extractants*

Alfonso Lemus-Solorio <sup>1</sup>, María Elena Núñez-Gaytán<sup>1</sup>, Ana María Núñez-Gaytán<sup>1</sup>, Martha Angélica Lemus-Solorio <sup>2</sup>, Sandra Núñez-Hernández<sup>1</sup>

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

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

Ciudad Universitaria; Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, Edificio “E”, Planta Baja. Laboratorio de Investigación a Microescala. Morelia, Michoacán; México.

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

**Recibido:** 01 de Abril del 2021

**Aceptado:** 25 de Junio del 2021

**Publicado:** 30 de Junio del 2021

**Resumen.** - *El oro es un metal valioso. Hoy día, se tiene interés en la recuperación de este metal de fuentes primarias y secundarias (basura electrónica). Las técnicas de separación a base de membranas han incrementado su importancia ya que mediante la modificación de sus propiedades físicas y químicas dan como resultado su capacidad de separación de los analitos de interés. En este trabajo se estudió la eficiencia en la separación y recuperación de trazas de oro en HCl 5 M mediante un sistema de membranas poliméricas. Para ello, se sintetizaron membranas con diferente composición del soporte polimérico, plastificante y acarreador. El polímero utilizado fue el triacetato de celulosa y como acarreador y plastificante un fosfato orgánico (tris(2-etil-hexil) fosfato). Se utilizó una celda de dos compartimentos separados por la membrana polimérica y con una agitación de 500 rpm. El ciclo de operación del sistema fue de 180 minutos. La fase de alimentación contenía 0.2 mM de oro (III) en un medio concentrado de ácido clorhídrico 5 M y como fase de recuperación una solución salina. La membrana con mayor eficiencia presentó una composición del acarreador de 53.3% de tris(2-etil-hexil) fosfato. La concentración de oro se midió con un espectrofotómetro UV-Vis (modelo Lambda 40, marca Perkin-Elmer) a una longitud de onda de 313 nm. Se observó que la recuperación de oro es del 76% en un ciclo de operación. El acarreador demostró ser eficiente para la recuperación del metal en un medio concentrado de ácido clorhídrico 5 M.*

**Palabras clave:** Eficiencia de una membrana; Permeabilidad; Separación de metales preciosos; Membranas poliméricas; Acarreadores fosforados.



**Abstract.** - Gold is a valuable metal. Nowadays, there is interest in the recovery of this metal from primary and secondary sources (electronic waste). Membrane-based separation techniques have become increasingly important because by modifying their physical and chemical properties they result in their ability to separate the analytes of interest. In this work, the efficiency in the separation and recovery of trace gold in 5 M HCl using a polymeric membrane system was studied. For this purpose, membranes with different composition of the polymeric support, plasticizer and carrier were synthesized. The polymer used was cellulose triacetate and as carrier and plasticizer an organic phosphate (tris(2-ethyl-hexyl) phosphate). A two-compartment cell separated by a polymeric membrane and with an agitation of 500 rpm was used. The operating cycle of the system was 180 min. The feed phase contained 0.2 mM gold (III) in a concentrated medium of 5 M hydrochloric acid and as recovery phase a saline solution. The membrane with the highest efficiency presented a carrier composition of 53.3% tris (2-ethyl-hexyl) phosphate. The gold concentration was measured with a UV-Vis spectrophotometer at a wavelength of 313 nm. Gold recovery was observed to be 76% in one cycle of operation. The carrier proved to be efficient for metal recovery in a concentrated 5 M hydrochloric acid medium.

**Keywords:** Membrane efficiency; Permeability; Precious metal separation; Polymeric membranes; Phosphorus carriers.

## 1. Introducción

Existe una necesidad tecnológica en la industria química de encontrar nuevos métodos en procesos de separación, concentración y purificación de las sustancias presentes en una mezcla. En los últimos años la utilización de métodos de separación por medio de membranas está experimentando un elevado crecimiento motivado fundamentalmente por las severas restricciones a las que están siendo sometidos los procesos de extracción en base a disolventes.

La edad de oro de la tecnología de las membranas (1960-1980) comenzó en 1960 con la invención de Loeb y Sourirajan de la primera membrana asimétrica de ósmosis inversa (RO) de acetato de celulosa. Este desarrollo estimuló tanto el interés comercial como académico, primero en la desalinización por ósmosis inversa, y luego en otras aplicaciones y procesos. Durante este período, se lograron avances significativos en prácticamente todas las fases de la tecnología de las membranas: aplicaciones, herramientas de investigación, procesos de formación de membranas, estructuras y configuraciones químicas y físicas. La ósmosis inversa fue un

proceso establecido con plantas industriales instaladas en todo el mundo.

En el sentido más general, una membrana es una barrera selectiva que separa dos fases y restringe el transporte de varias especies químicas de una manera bastante específica. Hay membranas naturales (existentes en las células biológicas) y membranas sintéticas. Una membrana puede ser porosa o no porosa, simétrica o asimétrica en su estructura; Puede ser neutral, puede llevar cargas positivas o negativas. Su grosor puede variar entre menos de 100 nm a más de un centímetro. Los tamaños de poro pueden variar de 1 nm a 50  $\mu\text{m}$ .

En comparación con otros procesos de separación, la membrana es simple de instalar y requiere supervisión mínima [4]. Además, ocupa menos espacio y no tiene partes móviles; por lo que casi no necesita mantenimiento [5]. La propiedad clave que se explota es la capacidad de una membrana para controlar la velocidad de permeación de una especie química a través de la membrana. En cada tipo de membrana el mecanismo de separación es diferente, jugando en general un papel importante las interacciones



moleculares entre la membrana y los fluidos. En virtud de las diferencias en su grado de afinidad, la velocidad de transporte a través de la membrana será diferente para cada componente, siendo posible pues el transporte selectivo, o sea, la separación. Basado en el material, las membranas sintéticas se clasifican en inorgánicas y poliméricas [6].

En gran medida la recuperación y el reciclado resultan atractivos considerando el costo del proceso, en cuyo aprovechamiento se basa en que el valor de los productos recuperados exceda al valor del tratamiento. Esto ha llevado al uso irracional de sustancias químicas en la gran variedad de actividades que desarrolla la sociedad moderna. Un claro ejemplo es el uso irracional de las sustancias químicas en la extracción de oro, en donde se trabajan con grandes cantidades de solución de cianuro, una sustancia sumamente tóxica empleada para lavar el oro y que también acaba con la biosfera.

En el caso del oro por su enorme valor, su recuperación no representa un gran problema, siempre hay un mercado dispuesto a adquirirlo. Por ello es necesario incrementar las alternativas de mejoras e innovaciones en la recuperación de este metal precioso en efluentes hidrometalúrgicos ácidos.

Para estudiar las propiedades que presentan las membranas desde el punto de vista químico hay que considerar, la naturaleza química de la membrana y de las especies permeantes. En primer lugar, las especies permeantes deben penetrar en la membrana, a continuación, atravesar la membrana y finalmente salir de la misma. Aunque es lo que sucede en la segunda etapa lo que determinará fundamentalmente el transporte, para comprender totalmente el proceso, es necesario saber cómo las especies entran y abandonan la membrana. Este proceso de transporte es mediado por el acarreador (figura 1).

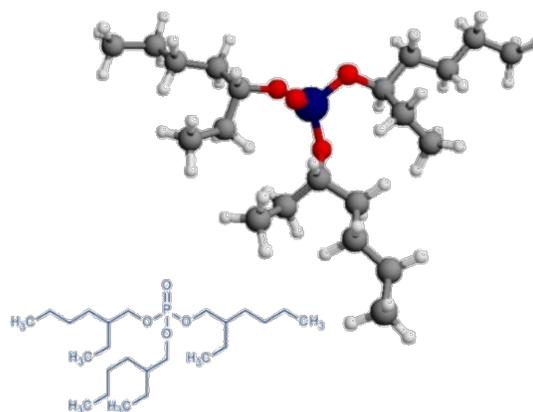
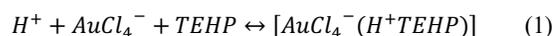


Figura 1. Molécula del agente de transporte tris (2-ethylhexil) fosfato

El ácido cloroaurico ( $\text{HAuCl}_4$ ) presente en la solución de la fase de alimentación da lugar a un ión complejo  $\text{AuCl}_4^-$  con afinidad hacia el acarreador TEHP luego se forma un complejo “acarreador + especie a separar” en la superficie de la membrana ecuación (1):



El complejo  $\text{AuCl}_4^-(\text{H}^+\text{TEHP})$  puede moverse en la superficie de la membrana y desplazarse al lado opuesto. En el lado de la fase de recuperación la especie  $\text{AuCl}_4^-$  es convertida en  $\text{AuCl}_3$  a bajas concentraciones del ion cloruro. La estabilidad efectiva de la mayoría de los complejos es función de la concentración del ligando y del pH de la solución ecuación (2):



Debido a que existe un gradiente de concentración, este acarreador acopla el flujo de dos especies. Debido a este acoplamiento, una de las especies puede moverse contra su gradiente de concentración, siempre que el gradiente de concentración de la segunda especie acoplada sea suficientemente grande, en este caso trasladará una cantidad neta de protones  $\text{H}^+$  de la fase de alimentación a la fase de recuperación.



La eficiencia de extracción de este acarreador se deriva principalmente de su grupo fosforil, el átomo de oxígeno es el responsable en la

## 2. Metodología

### 2.1 Preparación de membranas.

Una membrana polimérica de inclusión está compuesta por un polímero, un plastificante y un acarreador. El acarreador es esencialmente el responsable de transportar la especie de interés a través de la membrana. El soporte polimérico le proporciona a la membrana fuerza mecánica, mientras que el plastificante le provee elasticidad y flexibilidad [8].

Para efectuar la preparación de las membranas se procedió como sigue (figura 2):

1. Se disolvió el triacetato de celulosa (soporte polimérico) en diclorometano (diluyente orgánico volátil) a temperatura ambiente.
2. En el siguiente paso se añadieron el acarreador y plastificante [Tris(2-etil-hexil) fosfato] y la solución se agitó durante 30 minutos para obtener una solución homogénea.
3. Posteriormente la mezcla se colocó en un molde de vidrio circular.

coordinación del enlace formado con el metal en la ecuación (3):



4. El disolvente de esta solución mixta se dejó evaporar lentamente en el recipiente de vidrio circular durante 48 horas a temperatura ambiente. La membrana se forma después de la evaporación del disolvente orgánico y posteriormente se desprende la membrana del molde.

### 2.2 Estudio de transporte de oro (III) a través de la membrana.

Se utilizó una celda de dos compartimentos separados por la membrana polimérica. La fase de alimentación se preparó a partir de una solución de oro certificada de 1025 ppm en HCl al 5% (Aldrich). La fase de recuperación contenía una solución salina de NaCl 0.1 M.

Una vez terminado el paso anterior, inmediatamente se procede al armado del equipo, tomando precaución de que no haya fugas en las conexiones.

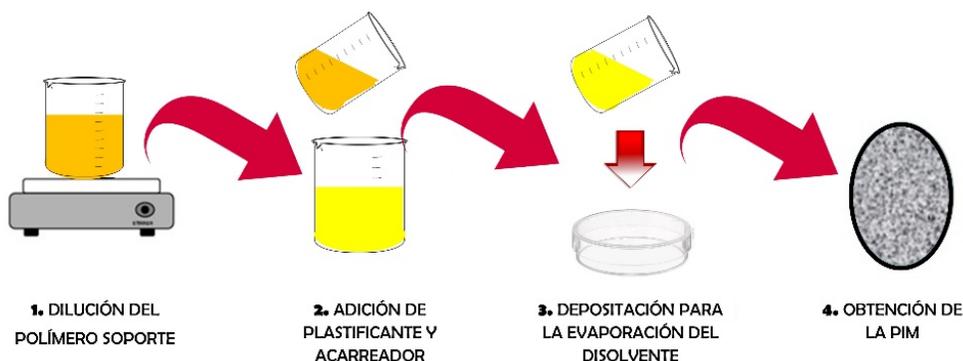


Figura 2. Esquema general para la elaboración de la membrana polimérica de inclusión (PIM).



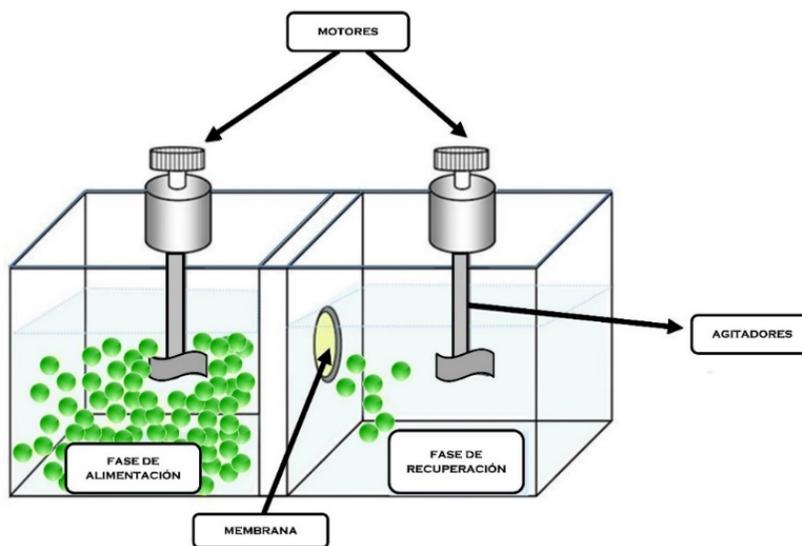
La descripción del aparato de separación, son dos compartimentos de forma cúbica con un orificio circular en uno de sus lados, en la que la película de la membrana se sujeta firmemente entre los dos compartimentos y que sirve como área de transporte en el proceso, también está provisto de dos motores con agitadores los cuales se introducen hasta que llegue casi al fondo de cada uno de los compartimentos. Ambas fases se agitan mediante los motores colocados en la parte superior a una velocidad de 500 rpm para asegurar que las fases tengan un mezclado uniforme. El ciclo de operación fue de 180 min. El aparato se muestra en la figura 3.

En la fase de alimentación se vierten 80 mL de la solución de oro (III) (Aldrich) 0.0002M y en la fase de recuperación se vierten 80 mL de NaCl 0.1 M.

El motor de agitación se conecta a una corriente eléctrica controlando la velocidad de agitación en ambas fases.

Las muestras de las fases de alimentación y recuperación se extrajeron periódicamente cada 30 minutos a través de un puerto de muestreo con una pipeta Pasteur y después se depositaron en frascos de 5 mL para posteriormente determinar las concentraciones de iones metálicos.

Para determinar la concentración de presente en ambos compartimentos se aplicó la técnica de espectrofotometría UV-Vis. La ley de Lambert-Beer estipula que la absorbancia de una solución es directamente proporcional de la concentración de la solución, por lo que la espectrofotometría UV-Vis puede usarse para determinar la concentración del oro en la solución. Se seleccionó una longitud de onda de 313 nm, para realizar las medidas que corresponde a un máximo de absorbancia del oro.



**Figura 3.** Sistema de membranas poliméricas de inclusión.

Al determinar la absorbancia de las distintas muestras, se utilizan cubetas espectrofotométricas con un paso óptico de 10,0 mm y un volumen máximo de 3,0 mL. Antes de efectuar las medidas

se ha de comprobar, de acuerdo con lo indicado en la parte teórica de este trabajo, que las cubetas estén perfectamente limpias y que las paredes transparentes estén secas. Es muy importante no



tomar siempre la cubeta por los lados traslúcidos, introducirla en el área de muestras de manera que los dos lados transparentes de la cubeta queden hacia los lados abiertos del soporte, y cerrar la puerta del área de muestras.

Para terminar con el ciclo de operación, basta con suprimir la agitación de las soluciones en ambas fases.

### 2.4 Eficiencia de la membrana.

Se sintetizaron 12 membranas poliméricas de inclusión con diferente composición del fosfato orgánico y del triacetato de celulosa. Las

membranas se colocan en medio de una celda de permeación de dos compartimientos, separando las fases de alimentación y recuperación. Ambas fases se agitan mediante unos motores colocados en la parte superior a una velocidad de 500 rpm para asegurar que las fases tengan un mezclado uniforme. Se tomaron muestras a intervalos de 30 minutos de tiempo durante el transcurso del experimento para evaluar la separación del metal.

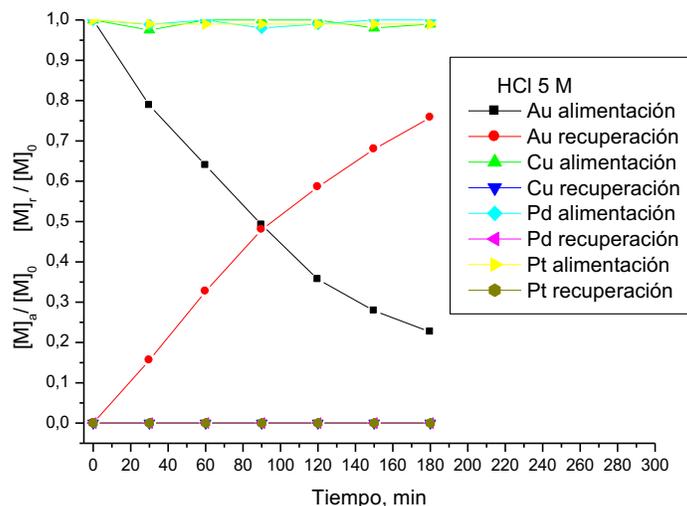
La eficiencia de cada membrana en la extracción de oro se evaluó con la determinación de la permeabilidad de la membrana y el porcentaje de oro obtenido en la fase de recuperación.

## 3. Resultados y Discusiones

### 3.1 Selectividad del oro

Para estudiar la selectividad del acarreador TEHP, el sistema de membrana descrito anteriormente para el oro se aplica, sin embargo, en esta ocasión el estudio está centrado principalmente en la recuperación de los metales que son: platino, paladio y cobre, metales que

frecuentemente se asocian al oro en fuentes primarias y secundarias. En la figura 4.2 se puede observar las fracciones molares de los diferentes metales, incluyendo el oro como metal de estudio; tanto en la fase de alimentación como en la de recuperación.



**Figura 4.** Transporte de Au (III), Pd (II), Pt (II) y Cu (II) a través de la membrana óptima. Composición de membrana: 53.3% de TEHP; Alimentación: [Au (III)] = [Pd (II)] = [Pt (II)] = [Cu (II)] =  $2 \times 10^{-4}$  M; Recuperación: [NaCl] = 0.1 M



### 3.2 Permeación de Au (III) a través de las membranas.

La determinación de presente en ambos compartimentos se llevó a cabo mediante la técnica de espectrofotometría UV-Vis, esta técnica se basa en la aplicación de la ley de Beer-Lambert: “la cantidad de luz absorbida por una sustancia es función exponencial de su concentración y del paso óptico de la radiación”.

Esta técnica permite el seguimiento dinámico del flujo de oro (III) a través de la membrana

midiendo la absorbancia óptica; atendiendo a lo indicado en el párrafo anterior proporciona, por lo tanto, las concentraciones de Au (III) presentes en muestras extraídas periódicamente.

El flujo de iones a través de la membrana se determina mediante la siguiente ecuación:

$$J = \left(\frac{V_{fs}}{S_m}\right) \cdot \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

También puede escribirse cómo:

$$J = PC \therefore P[Au^{3+}] = \left(\frac{V_f}{S_m}\right) \frac{dAu^{3+}}{dt} \quad (5)$$

Integrando la ecuación 4.5 y bajo la condición limitante de baja concentración de iones permeables, la relación entre  $\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$  y el tiempo es lineal (Danesi et al., 1982) y puede describirse por la ecuación:

$$\ln \frac{[Au^{3+}]_t}{[Au^{3+}]_0} = -P \frac{S_m}{V_f} t \quad (6)$$

$$\ln \left[1 - \frac{[Au^{3+}]_t}{[Au^{3+}]_0}\right] = -P \frac{S_m}{V_f} t \quad (7)$$

Las ecuaciones 6 y 7 pueden ser representadas por una línea recta:

$$y = mx + b \quad (8)$$

donde:

**Tabla 1.** Parámetros, simbología y unidades de medida.

Parámetros	Simbología	Unidades
Flujo del ion metálico	J	$\frac{cm \cdot M}{min}$
Volumen de la fase de alimentación (a), volumen de la fase de recuperación (r).	$V_{a,r}$	$cm^3$
Concentración de oro (III) a un tiempo (t).	$[Au^{3+}]_t$	M
Concentración de oro (III) inicial.	$[Au^{3+}]_0$	M
Área efectiva de la membrana	$S_m$	$cm^3$
Permeabilidad.	P	$\frac{cm^2}{min}$
Concentración de la especie en estudio.	C	$\frac{cm}{min}$
Concentración de la fase de alimentación (a), Concentración de la fase de recuperación (r).	$C_{f,r}$	M
Concentración inicial (0), concentración a un tiempo (t).	$C_{0,t}$	M

Será suficiente conocer el valor de la pendiente en esta recta y conociendo todas las constantes de la ecuación (6); se puede calcular la permeabilidad (P) en la fase de alimentación y con la ecuación (7) se calcula la permeabilidad en la fase de recuperación.

Con la finalidad de estudiar el transporte de oro (III) influenciado por los componentes de la membrana, se determinó el transporte de oro para membranas poliméricas de inclusión (PIM) a diferente composición de triacetato de celulosa (polímero) y del fosfato orgánico (plastificante y acarreador) en una celda de permeación. La fase de alimentación contenía trazas de Au (III) en el nivel de  $2 \times 10^{-4}$  M en ácido clorhídrico 5 M (Aldrich). La solución de recuperación fue de 0.1 M en medio cloruro. Se demostró que el medio cloruro es eficiente en la recuperación del oro.

Fue posible determinar la composición óptima de los componentes en la membrana. La membrana óptima es la que presenta un mayor transporte del

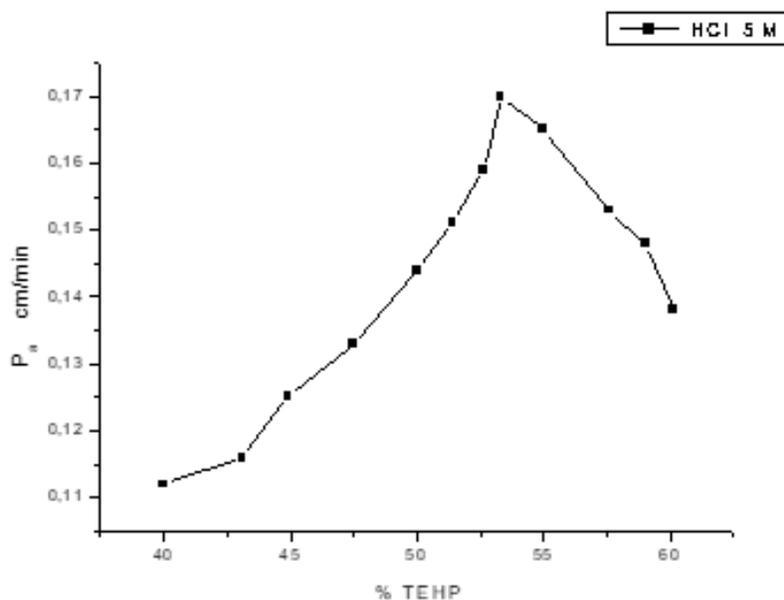


oro lo que corresponde al valor de permeabilidad más elevado. En la tabla 2, se observa que la membrana de composición 46.7% de triacetato de celulosa y un 53.3% de tris (2- etilhexil) fosfato es la más eficiente. La figura 5, es la representación gráfica de la tabla 2. La

membrana óptima separó un 76% del metal en un ciclo de operación de 180 minutos. La concentración se expresa en fracción molar del metal en cada fase,  $a/C_0$  para la fase de alimentación y  $r/C_0$  para la fase de recuperación.

**Tabla 2.** Eficiencia de las membranas. Valores de permeabilidad  $P_F$  para diferentes composiciones de membranas. TAC: triacetato de celulosa. TEHP: tris(2-etil-hexil) fosfato.

Membrana	%TAC	%TEHP	$P_F$ cm/min
M1	60	40	0.112
M2	56.9	43.1	0.116
M3	55.1	44.9	0.125
M4	52.5	47.5	0.133
M5	50	50	0.144
M6	48.6	51.4	0.151
M7	47.4	52.6	0.159
<b>M8</b>	<b>46.7</b>	<b>53.3</b>	<b>0.17</b>
M9	45	55	0.165
M10	42.4	57.6	0.153
M11	41	59	0.148
M12	39.9	60.1	0.138



**Figura 5.** Variación de permeabilidad con respecto a la concentración del tris (2-etilhexil) fosfato para el transporte de oro a través de la membrana.



**Tabla 3.** Transporte de Au (III) a través de la membrana óptima. Alimentación:  $2 \times 10^{-4}$  M de Au (III) en HCl 5 M. Recuperación: NaCl 0.1 M. Ciclo de operación: 180 min

Tiempo (min)	[Au (III)], ppm Alimentación	[Au (III)], ppm Recuperación	$[Au]_a / [Au]_0$ Fracción molar Alimentación	$[Au]_r / [Au]_0$ Fracción molar Recuperación
0	39.4	0	1	0
30	31.05	6.15	0.788	0.1561
60	25.20	12.871	0.6396	0.3267
90	19.371	18.915	0.4916	0.48
120	14.056	23.075	0.3567	0.5857
150	10.974	26.775	0.2785	0.6796
180	8.91	29.862	0.2261	0.758

En la gráfica de la figura 5, puede verse una curva de dispersión donde se aprecia claramente que la permeabilidad del oro depende de la composición de la membrana, se puede observar cómo, efectivamente, existe una composición óptima en el cual se presenta un valor alto de permeabilidad. Por lo que se deduce que la velocidad propia de la permeación, depende de las propiedades químicas (entre las que destaca la difusión facilitada).

### 3.3 Estudio de transporte selectivo.

Se debe enfatizar que, aunque en este estudio se demuestra que las membranas y el acarreador son permeables al oro, es conocido que el mecanismo selectivo de transporte varía de una membrana a otra, dependiendo de factores tales como la naturaleza química de la membrana y de las especies permeantes. Teniendo en cuenta este

hecho será, pues, necesario examinar el funcionamiento de la membrana para separar especies metálicas que frecuentemente se asocian al oro.

Para estudiar la selectividad de este acarreador, el sistema de membrana descrito anteriormente para el oro se aplica, pero esta vez el estudio está centrado principalmente en la recuperación de los metales que son: platino, paladio y cobre, metales que frecuentemente se asocian al oro en fuentes primarias y secundarias.

El cambio del estado de oxidación de algún elemento facilita a menudo los procedimientos de separación. [9] La estabilidad (y la solubilidad) de los complejos metálicos varía también con el estado de oxidación del ion metálico, habiéndose aprovechado este hecho para la separación de mezclas de iones metálicos.

**Tabla 4.** Concentración inicial de los diferentes metales en molaridad (M) y en partes por millón (ppm).

Metal	Concentración inicial en la fase de alimentación (M)	Concentración inicial en la fase de alimentación (ppm)
Platino	$2 \times 10^{-4}$ M	39.02 ppm
Paladio	$2 \times 10^{-4}$ M	21.28 ppm
Cobre	$2 \times 10^{-4}$ M	12.71 ppm
Oro	$2 \times 10^{-4}$ M	39.40 ppm



**Tabla 5.** Especies estudiadas y características de oxidación.

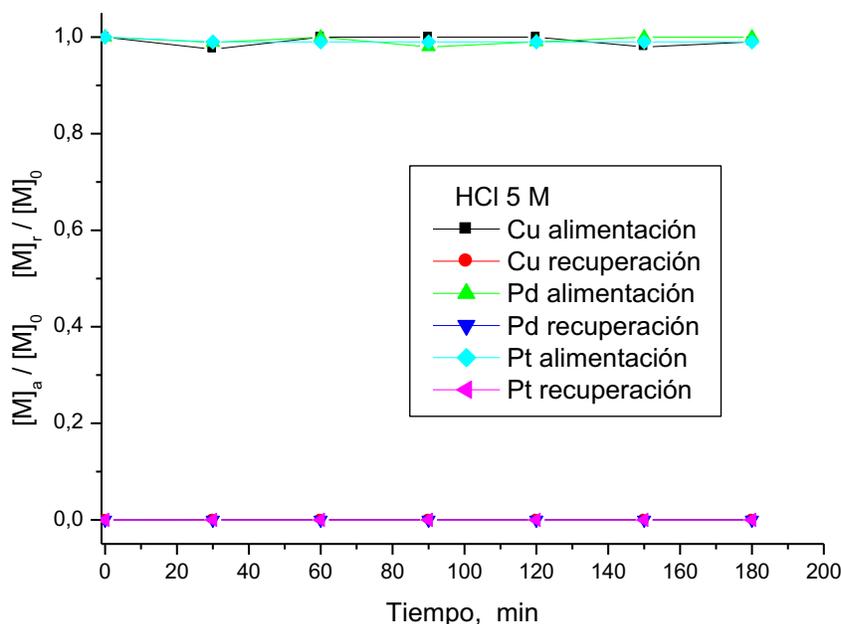
Metal	No. de oxidación	Especie
Au	III	$\text{AuCl}_4^-$
Pt	II	$\text{PtCl}_4^{2-}$
Pd	II	$\text{PdCl}_4^{2-}$
Cu	II	$\text{CuCl}_4^{2-}$

El oro se oxida a +I y +III, en ambos casos es un metal “clase b” o “soft” y por tanto coordina preferentemente con ligandos clasificados como bases blandas. La estructura y la carga del complejo formado varía considerablemente de un metal a otro, así como su estabilidad, y depende del estado de oxidación del metal. En la tabla 3, se presentan las especies estudiadas.

Para estudiar la selectividad del acarreador en la separación/recuperación de los diversos metales, el análisis se llevó a cabo utilizando membranas de composición 46.7% de triacetato de celulosa y un 53.3% de tris(2-etilhexil) fosfato. En la fase de alimentación se utilizó una solución de concentración  $2 \times 10^{-4} \text{M}$  para cada metal en un

medio de HCl 5M. En la fase de recuperación se empleó una solución de NaCl 0.1M. En la tabla 4 se indican las concentraciones iniciales de los metales estudiados.

A partir de los resultados anteriores se puede afirmar que la selectividad del extractante TEHP con respecto al oro es excelente. El Cu, Pd y Pt no se transportan a través de la membrana en un ciclo de operación de 180 min, a comparación del oro. Por tanto, la membrana óptima es selectiva para separar el Au (III) del Cu, Pd y Pt en las condiciones del proceso de separación por membranas poliméricas, como podemos verlo gráficamente en la figura 6.



**Figura 6.** Transporte de Pd (II), Pt (II) y Cu (II) a través de la membrana óptima; Composición de membrana: 53.3% de TEHP; Alimentación:  $[\text{Pd(II)}]=[\text{Pt(II)}]=[\text{Cu(II)}]= 2 \times 10^{-4} \text{M}$ ; Recuperación:  $[\text{NaCl}]= 0.1 \text{M}$ .

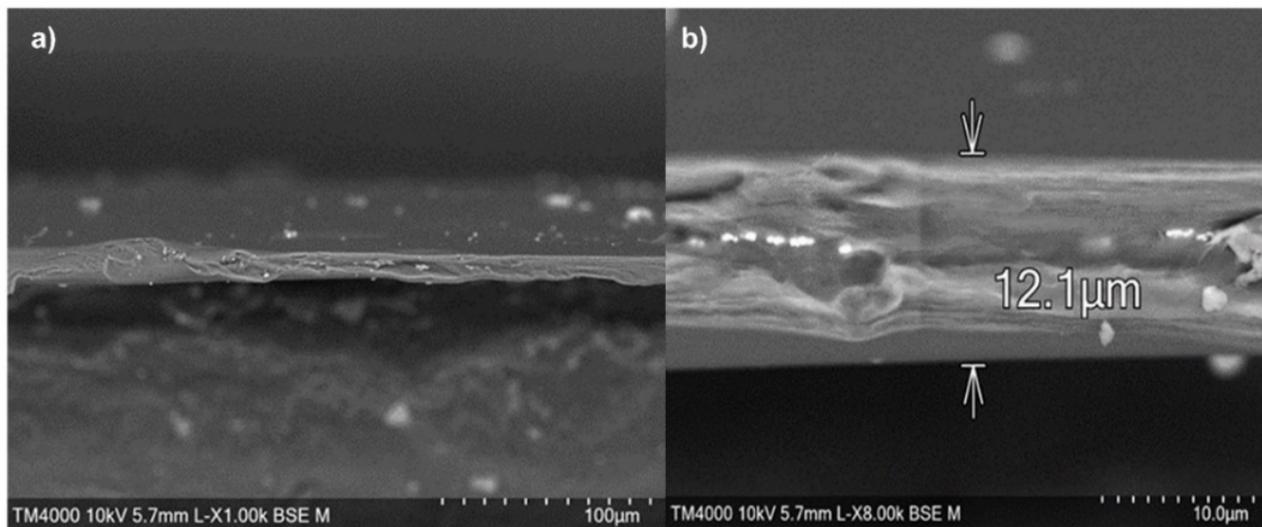


### 3.7 Morfología de la membrana.

La membrana se caracterizó por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se analizó la membrana optima. El análisis de las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (Microscopio electrónico de barrido HITACHI TM4000Plus) se muestra en la figura 7a. Se observa la morfología de la membrana en su interior y sobre la superficie. Se muestra la presencia de partículas irregulares de oro en el interior y sobre la superficie de la membrana (a y b). Se determinó el espesor de la membrana polimérica de inclusión. La figura 7b muestra que su espesor es de aproximadamente 12.1  $\mu\text{m}$ .

### 3.8 Espesor de la membrana.

Evidentemente, tratándose de un problema de difusión, cuanto mayor sea el camino a recorrer (espesor de la membrana), menor será la velocidad de transporte. Sin embargo, al reducir demasiado el espesor tiene un problema mecánico debido a que la película es muy delgada y se rompen (figura 8). Una forma de resolver este problema es optimizando la cantidad de triacetato de celulosa y del acarreador.



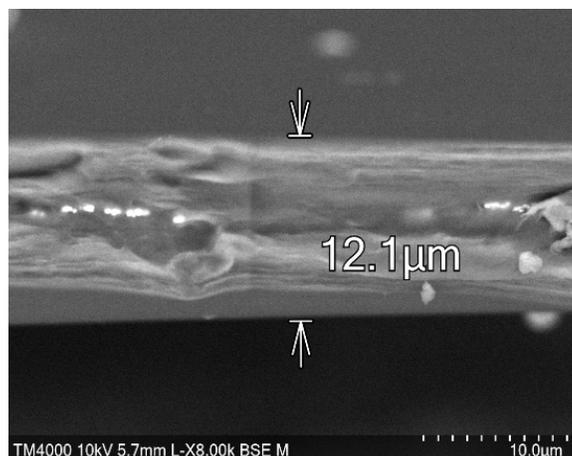
**Figura 7.** Microscopía electrónica de barrido de la MPI utilizada en medio de HCl 5 M. (a) Imagen del interior y superficie de la membrana. b) . Espesor de la membrana polimérica de inclusión que contiene el acarreador y plastificante tris(2-etilhexil) fosfato.



### 3. Conclusiones

El tris(2-etilhexil) fosfato (TEHP) funciona como acarreador y plastificante; siendo

eficiente para la recuperación de trazas de oro en medios concentrados de ácido clorhídrico (Aldrich) mediante la separación con membranas poliméricas de inclusión.



**Figura 8.** Espesor de la membrana polimérica de inclusión que contiene el acarreador y plastificante tris(2-etilhexil) fosfato. Microscopio HITACHI TM4000Plus

En el estudio de la selectividad con relación a otros metales como cobre (II), paladio (II) y platino (II), los resultados obtenidos muestran que ninguno de los metales mencionados es extraído en estas condiciones experimentales. Respecto a la extracción del oro (III) por parte del acarreador, se demostró que la separación es notable y se consigue en un periodo relativamente corto, por lo que se deduce que el TEHP es un agente de extracción selectivo para el oro (III)

La concentración óptima del polímero, acarreador y plastificante en la membrana favorece la separación eficiente del oro. El acarreador es sustancial para el transporte del metal, sin embargo, una cantidad excesiva de acarreador puede dar como resultado la acumulación del oro en la membrana. Asimismo, una cantidad excesiva de plastificante puede conducir a una pérdida de éste de la membrana debido a las condiciones hidrodinámicas del sistema; mientras que una cantidad insuficiente de plastificante puede conducir a

permeabilidades muy bajas. Se recuperó un 76% del oro en un tiempo relativamente corto que corresponde a un ciclo de operación de 180 min. Por tanto, la membrana polimérica de inclusión más eficiente contiene una composición óptima de 46.7 % (p/p) de triacetato de celulosa (polímero, TAC) y 53.3 % (p/p) de acarreador y plastificante (TEHP). La permeabilidad de la membrana es de 0.17 cm/min.

### 5. Reconocimiento de autoría

**Alfonso Lemus-Solorio:** Investigación; Escritura borrador original; Metodología; Análisis formal. **María Elena Núñez-Gaytán:** Investigación; Metodología; Supervisión; Adquisición de fondos. **Ana María Núñez-Gaytán:** Conceptualización; Metodología; Recursos. **Martha Angélica Lemus-Solorio:** Análisis formal; Curación de datos; Metodología; Investigación. **Sandra Núñez-Hernández:** Conceptualización; Validación; Análisis formal.



## Referencias

- [1] M. Mulder, Basic Principles of Membrane Technology, Kulwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992 pp1-26.
- [2] W. Pusch and A. Walch, Synthetic Membranes-Preparation, Structure, and Application, Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 21 (1982) 660.  
<https://doi.org/10.1002/anie.198206601>
- [3] Richard M. Baker, Membrane Technology and Applications, John Wiley & Sons, Ltd., England, 2004, pp6.
- [4] A. Ismail, K. Khulbe, and T. Matsuura, Gas Separation Membranes: Polymeric and Inorganic, Springer, 2015.
- [5] M. Stewart and K. Arnold, Gas Sweetening and Processing Field Manual, Gulf Professional Publishing, 2011.
- [6] A. Basile and F. Gallucci, Membranes for membrane Reactors: Preparation, Optimization and Selection, John Wiley & Sons, 2011.  
<https://doi.org/10.1002/9780470977569>.
- [7] Paulson, D., Membranes, the Finest Filtration, by Introduction to Crossflow Membrane Technology. Filtration News, 1995.
- [8] M. Sugiura, and H. Hirata, “Effect of Phospholipids on Carrier-Mediated Transport of Lanthanide Ions through Cellulose Triacetate Membranes”, Separ Sci Technol. 28. 1933-1937. 1993.  
<https://doi.org/10.1080/01496399308029252>.
- [9] W. F. Pickering, Química analítica moderna, editorial reverté s. a., 1980.



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](#)



# Estimación del confort térmico por variable física del entorno térmico: Un estudio en los espacios abiertos de la UABC-Sauzal, México

*Estimation of thermal comfort by physical variable of the thermal environment: A study in open spaces at UABC-Sauzal, Mexico*

López-Cañedo Jessica Yukie , Rincón-Martínez Julio César , Fernández-Melchor Francisco 

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Zona Playitas, CP. 22860 Ensenada, Baja California, México.

**Autor por correspondencia:** Francisco Fernández Melchor, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Zona Playitas, CP. 22860 Ensenada, Baja California, México. E-mail: [francisco.fernandez.melchor@uabc.edu.mx](mailto:francisco.fernandez.melchor@uabc.edu.mx), ORCID: 0000-0003-1669-7327.

**Recibido:** 10 de Diciembre del 2020

**Aceptado:** 2 de Mayo del 2021

**Publicado:** 6 de Mayo del 2021

**Resumen.** – *El confort térmico en espacios exteriores es una de las características esenciales de la calidad del medio ambiente urbano; además, puede influir significativamente en el desempeño, el bienestar, el confort y la sensación térmica de las personas. Por ello, en el diseño de los espacios exteriores se deben considerar los índices térmicos de confortabilidad como respuesta a las condiciones climatológicas del entorno en aras de promover su uso frecuente y saludable. El objetivo de esta investigación fue estimar, a partir del enfoque adaptativo, los rangos de confort térmico para espacios públicos exteriores a partir de cada una de las variables físicas del entorno térmico. El estudio se desarrolló en la ciudad de Ensenada durante el periodo cálido. La aplicación de evaluaciones, el diseño del cuestionario y el empleo de instrumentos de medición física, se realizaron a partir de la ANSI/ASHRAE 55, ISO 10551 e ISO 7726. La estimación se realizó con la correlación de las variables físicas registradas y la sensación térmica percibida a partir de dos métodos estadísticos univariados: Medias por Intervalos de Sensación Térmica y Regresión Lineal Simple. Los rangos de confort para la temperatura fueron de 19,2 a 25,1 °C y de 20,1 a 23,8 °C; para la humedad relativa, de 54,3 a 83,6 % y de 0,01 a 99,9 %; y, para la velocidad de viento, de 0,1 a 2,6 m/s y de 0,1 a 5,9 m/s, respectivamente. La estimación obtenida con el primer método de análisis ofreció mayor consistencia respecto a las condiciones reales de evaluación.*

**Palabras clave:** Confort térmico; correlación de datos; espacios exteriores; sensación térmica; variables físicas del ambiente.

**Abstract.** – *Thermal comfort in outdoor spaces is an essential characteristic for the urban environment quality; in addition, it can significantly influence the performance, well-being, comfort and thermal sensation of people. Therefore, the design of outdoor spaces must consider*

*the thermal comfort ranges in response to the environment conditions in order to promote their frequent and healthy use. The main objective of this work was to estimate the thermal comfort ranges for outdoor public spaces from the adaptive approach and each of the physical variables of the thermal environment. The study was carried out in Ensenada city during the warm period. The evaluations, questionnaire and physical measurement instruments attended what is suggested in the ANSI/ASHRAE 55, ISO 10551 and ISO 7726. The analysis was carried out with the correlation of the registered physical variables and the perceived thermal sensation from two univariate statistical methods: Averages by Thermal Sensation Intervals and Simple Linear Regression. The comfort ranges for the temperature were 19,2 to 25,1 °C and 20,1 to 23,8 °C; for relative humidity were 54,3 to 83,6 % and from 0,01 to 99,9 %; and, for wind speed were 0,1 to 2,6 m/s and 0,1 to 5,9 m/s, respectively. The values obtained with the first analysis method showed greater consistency with respect to the real evaluation conditions.*

**Keywords:** Data analysis; thermal comfort; thermal sensation; outdoor spaces; physical variables of the environment.

## 1. Introducción

El confort térmico en espacios exteriores tales como plazas, parques, explanadas, malecones, etc., es uno de los factores que influyen en el adecuado desarrollo de actividades, por lo que el conocer sus condiciones de confort térmico establece las bases para una correcta toma de decisiones en el diseño arquitectónico de los espacios exteriores.

El proyecto Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces (RUROS) [1], [2] demostró a nivel internacional la importancia que tiene la investigación sobre el confort térmico en exteriores, generando modelos de confort térmico en cada uno de los casos de estudio con aportes en proyectos de tipo turístico, recreativo y áreas de exposiciones al aire libre [3].

Los estudios del confort térmico en espacios exteriores pueden tener repercusiones importantes en las disciplinas que dan forma al entorno urbano, debido a que cantidad e intensidad de las actividades realizadas en espacios abiertos se ve afectada por el nivel de incomodidad experimentado por los usuarios cuando se exponen a las condiciones climatológicas del exterior [4].

El confort térmico, en la norma ISO 7730 se define como «(...) esa condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico» [5], la ANSI/ASHRAE 55 agrega que la satisfacción con el ambiente térmico es determinada por evaluaciones subjetivas [6].

La sensación térmica está influenciada de manera prioritaria por los siguientes factores ambientales, según la norma ya citada [5], [6]: la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar; sin embargo, algunos otros factores con menor influencia en la percepción térmica, pero igualmente considerados en el estudio de este fenómeno, son: las características del cuerpo humano (el género, la edad, la vestimenta, la cantidad y tipo de alimentos ingeridos por el individuo), el estado físico y emocional, los hábitos, las preferencias personales y las condiciones naturales y/o construidas del entorno, en términos generales [7], [8], [9], [10].

Para los estudios del confort térmico son utilizados dos enfoques:

- Enfoque de predicción: Se trabajan datos de laboratorio, con condiciones de pruebas controladas. El individuo se

estudia aislado de su hábitat y se toman en cuenta las reacciones fisiológicas (aclimatación) voluntarias e involuntarias para alcanzar el confort térmico. Se considera al humano como receptor pasivo en espera del balance energético. Enfoque de adaptación: Se trabajan datos de campo, las condiciones de prueba tienen variación continua y el individuo se estudia en su hábitat. Se toman en cuenta reacciones fisiológicas (aclimatación) y psicológicas (expectativa, experiencia, conducta). Se considera al humano como receptor activo en busca del confort térmico [11], [12], [13].

A lo largo del tiempo se han desarrollado índices térmicos para determinar el confort, sin embargo, estos han sido basados con un enfoque de intercambio de calor los cuales se han clasificado en índices empíricos como lo son el índice de malestar [14], índice de temperatura-humedad [15], índice de sensación térmica [16] e índices racionales basados en el balance energético humano [17], [18], [19], [20]. Cabe mencionar que ninguno de los índices mencionados toma en cuenta las variables psicológicas que influyen en la percepción térmica [21], [22].

Las condiciones climatológicas de una localidad condicionan la forma de vida de sus habitantes, tanto en espacios interiores como en exteriores [4], ya que las condiciones de confort térmico en espacios interiores, que de alguna manera pueden ser controladas, se han realizado más estudios al respecto (ej. [23], [24], [25], [26]).

En el diseño de los espacios exteriores, al igual que en los interiores, debe haber parámetros de confort térmico, sobre todo porque en estos espacios el sujeto se encuentra expuesto completamente a las

condiciones climatológicas, por esta razón, es que existen múltiples investigaciones en torno al confort térmico en exteriores a nivel internacional (ej. [27], [28], [29], [30]), así como a nivel nacional (ej. [3], [4], [31], [32]), es importante mencionar que algunas investigaciones se enfocan en casos particulares, como por ejemplo, determinar el impacto de la vegetación (ej. [33], [34], [35]) y geometría urbana (ej. [36], [37], [38]) en el confort térmico en exteriores

En Ensenada, el número de estudios sobre el confort térmico se encuentra limitado a investigaciones en espacios interiores [39]. Con base en lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue estimar rangos de confort térmico para espacios exteriores en la ciudad de Ensenada, Baja California, durante el periodo cálido. La investigación se desarrolló desde un enfoque adaptativo, a partir de la aplicación de cuestionarios y la medición simultánea de las variables físicas del entorno, tales como la temperatura de globo negro, la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la velocidad del viento, que influyen en la sensación térmica de las personas.

## **2. Métodos y herramientas**

El procedimiento metodológico que se llevó a cabo en esta investigación permitió recabar, registrar y procesar los datos requeridos para el estudio. La metodología se dividió en los siguientes apartados:

### *2.1. Caso y periodo de estudio*

El estudio se realizó en la ciudad de Ensenada, Baja California, México. El polígono de referencia fue la unidad Sauzal de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), ya que sus instalaciones cuentan con diversas áreas exteriores que, además de permitir la conectividad entre los edificios, proporcionan áreas de convivencia, descanso,

estudio y recreación. Estos espacios cumplen con características de uso público que no son exclusivos de una institución educativa, tales como: explanadas, malecón, plazas sociales, y circulaciones peatonales, entre otros.

Cabe mencionar que las características generales de los espacios exteriores en los que se llevaron a cabo las evaluaciones, se encuentran en las siguientes: equilibrio entre áreas naturadas y superficies pavimentadas; topografía prácticamente plana; sombreado predominantemente natural a partir de árboles; elementos paisajísticos; amplitud espacial que favorece la iluminación y ventilación abundantes (por su proximidad con el mar); condiciones de humidificación permanentes derivadas de la brisa marina que baña a la ciudad; mobiliario urbano para actividades sedentarias; altura promedio de edificios aledaños de dos niveles; senderos de materiales pétreos, y, en algunos casos, elementos artificiales de sombreado (pergolados, malla sombra, etc.) (Figura 1).

El clima en esta ciudad se clasifica en seco extremoso (BS0 ks(e)) [40] y su bioclima se agrupa en templado-seco [41].

Las condiciones climáticas anuales son representadas por una temperatura media de 17,3 °C, una humedad relativa media de 75,8 %, una precipitación pluvial total de 217,3 mm y una velocidad media de viento de 2,5 m/s, cuya incidencia dominante es del rango suroeste-noroeste [42].

El estudio se llevó a cabo durante el periodo cálido [43], del 03 septiembre al 10 de octubre de 2019, caracterizado por temperaturas y humedad relativa, máximas y mínimas promedio, de 24,9 °C y 17,3 °C, y, de 92,8 % y 65,3 %, respectivamente, una precipitación pluvial media de 2,3 mm y una velocidad de viento promedio de 2,2 m/s proveniente del suroeste.

Los horarios en los que se realizaron las evaluaciones correspondieron a aquellos en los que dan lugar las condiciones higrotérmicas extremas en un día típico [41], es decir, a las 06 h 00 y a las 15 h 00, haciendo ajustes de acuerdo a la disponibilidad del recurso humano, por lo que los horarios fueron de 08 h 00 a 11 h 00 y de 14 h 00 a 17 h 00, en promedio.



Figura 1. Ejemplo de espacios de estudio en la UABC. Fuente: Captura en sitio.

## *2.2. Diseño de la muestra poblacional*

La muestra poblacional se diseñó con un nivel de confianza del 95 % y un intervalo de confianza del 5 %. Con lo anterior, la muestra diseñada correspondió a 384 evaluaciones, no obstante, dadas las características de organización y aceptación del estudio, fue posible recabar 425 observaciones en el periodo mencionado, por lo que la muestra estudiada superó a la muestra diseñada.

El diseño de la muestra se realizó a partir de la población total de la ciudad de Ensenada (como universo de estudio), pues el objetivo principal de la investigación fue la estimación de rangos que permitieran reflejar una representatividad de la población general.

En este sentido, las características generales que permitieron homogenizar tanto al universo blanco como a la muestra poblacional diseñada, son las siguientes: de preferencia que fueran originarias de la ciudad, de lo contrario, que tuvieran al menos un año de residencia en ésta; que durante el momento de evaluación estuvieran desarrollando una actividad cuya intensidad estuviera entre sedentaria y normal (0,8–1,5 met), así como, un aislamiento térmico por arropamiento de entre ligero y moderado (0,8–1,2 clo); que estuvieran desarrollando algún tipo de actividad cotidiana típica de espacios exteriores (convivencia, descanso, esparcimiento, estudiar, caminar, etc.), entre otros.

Características de mayor particularidad en cada persona como la edad, el género, el historial térmico, el color de piel, la estatura y el peso, por mencionar algunas, fueron despreciables en la muestra levantada con el fin de recolectar una base de datos diversa y con ello lograr indicadores de confortabilidad térmica de mayor alcance para la población blanco, además dados los alcances perseguidos con el estudio, sin que ello signifique que no tienen

influencia en la sensación térmica de los sujetos.

## *2.3. Variables e instrumentación*

Para efectos de establecer una relación entre la sensación térmica (ST) de las personas y los niveles higrotérmicos que se presentaron en los espacios exteriores de evaluación en cada caso, se determinó medir y registrar la lectura de las siguientes variables físicas: la Temperatura de Globo Negro (TGN), la Temperatura de Bulbo Seco (TBS), la Humedad Relativa (HR) y la Velocidad del Viento (VV).

Las variables físicas fueron medidas y registradas con un monitor de ambiente térmico de tres arreglos (mca. 3M, mod. QUESTemp 36-3). Este equipo de monitoreo ambiental cuenta con una resolución de 0,1 °C para la TGN y la TBS, 0,1 % para la HR y 0,1 m/s para la VV, y una precisión de  $\pm 0,5$  °C para la TGN y la TBS,  $\pm 5,0$  % para la HR y  $\pm (4,0$  % lectura + 0,1 m/s) para la VV. La selección, la distribución y la operación de los instrumentos y el equipo de medición estuvieron en función de las variables físicas registradas, y de las especificaciones técnicas que la ISO 7726 [44] y la ANSI/ASHRAE 55 [6] sugieren al respecto, lo que permite clasificar como clase I a la base de datos obtenida durante el estudio [13].

Las alturas adecuadas de los sensores del monitor de estrés térmico, según ANSI/ASHRAE 55 [6], son de acuerdo a la posición del sujeto estudiado: Sentado o de pie. En este caso, por practicidad y seguridad del equipo, la disposición de las alturas de los sensores se fijó de la siguiente manera: 0,10 m, 1,10 m y 1,70 m (Figura 2).

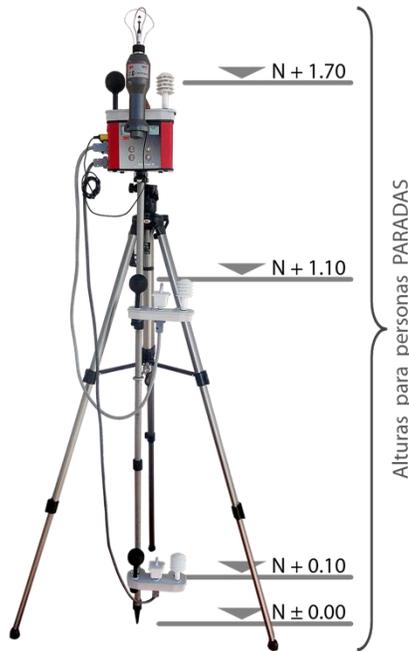


Figura 2. Instrumentos de medición utilizados. Fuente: Rincón [45].

#### 2.4. Diseño del cuestionario

La elaboración del cuestionario se basó en la escala subjetiva de ST de siete puntos contenidas en las normas ISO 10551 [46] y ANSI/ASHRAE 55 [6], la cual fue sugerida en principio por Fanger [17], como se muestra en la Tabla 1. Ya que estas normas fueron diseñadas para espacios interiores, solo se retomaron los conceptos aplicables en el estudio de espacios exteriores.

Tabla 1. Escala de sensación térmica.

Sensación térmica (ST)	Escala [46] [6] [17]	Adaptación
Mucho calor	+ 3	7
Calor	+ 2	6
Algo de calor	+ 1	5
Ni calor, ni frío	0	4
Algo de frío	- 1	3
Frío	- 2	2
Mucho frío	- 3	1

Fuente: Elaboración propia con base en Rincón [45].

De la misma manera, fueron analizados cuestionarios diseñados para estudios del confort térmico en espacios exteriores con el enfoque adaptativo (ej. [1], [3], [47]). La estructura final del formato quedó comprendida por seis secciones como se muestra en la Figura 3.

#### 2.5. Metodología para la aplicación de cuestionario

Con el fin de proporcionarle al usuario mayor facilidad al dar respuesta a las preguntas de ST y de Preferencia Térmica (PT), las escalas fueron implementadas a manera de gráficos, dispuestos en la forma de un cubo (Figura 4) en el que cada cara consistía en una escala (representada con emoticones, flechas, colores y textos).

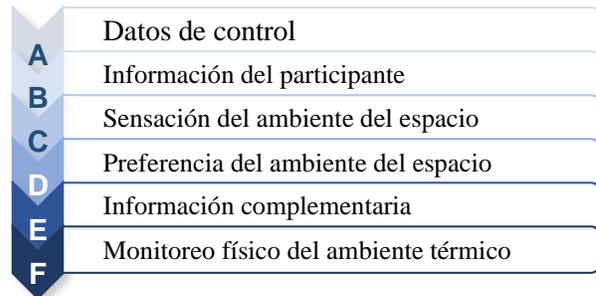


Figura 3. Secciones del cuestionario. Fuente: Elaboración propia.

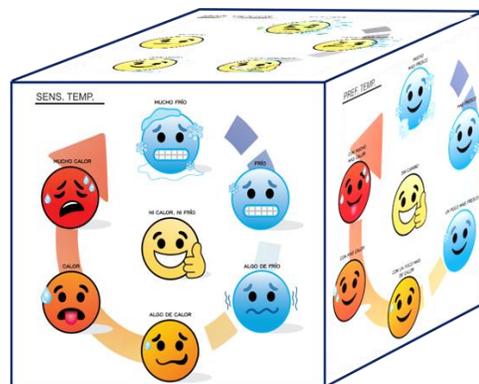


Figura 4. Representación gráfica de la ST y la PT. Fuente: Rincón [45].

Tanto los espacios exteriores en donde se levantaron las evaluaciones, así como los usuarios, fueron seleccionados de manera aleatoria procurando que éstos estuvieran en distintos escenarios para generar una variabilidad en las respuestas.

Para la aplicación de las evaluaciones se conformaron equipos de dos personas, ya que los datos de ST se recabaron simultáneamente con las mediciones de las variables del ambiente térmico, por lo que una persona realizaba las preguntas al usuario, mientras que la otra tomaba lectura del instrumental. Cada evaluación fue llevada a cabo en un promedio de tiempo de dos minutos (Figura 5).

#### 2.6. Conformación y preparación de la base de datos

El programa utilizado para la digitalización y almacenamiento de los datos fue Microsoft Excel®, utilizando una hoja de cálculo convencional, dado a la diversidad de herramientas que ofrece para la captura, el procesamiento y la graficación de datos. Se desarrolló un formato tipo matriz en la cual se presentan los datos por filas y por columnas, en el que cada fila representa las observaciones levantadas (cuestionarios) y las columnas representan las variables recabadas en la evaluación.



Figura 5. Aplicación de cuestionarios. Fuente: Captura en sitio.

El procedimiento que se llevó a cabo para la preparación de la base de datos consistió en la omisión de los valores atípicos a fin de promover consistencia en la base de datos. El proceso que se realizó para la identificación de los datos atípicos fue el de Jerarquía Ponderada, propuesta por Rincón [45].

#### 2.7. Métodos estadísticos univariantes de correlación de datos

La correlación y el análisis de la base de datos se realizó con dos métodos estadísticos de correlación univariable: Regresión Lineal Simple (RLS) y Medias por Intervalo de Sensación Térmica (MIST), los cuales son utilizados con mayor frecuencia en los estudios de confort térmico (ej. [48], [10], [3], [23], [24], [39], [30]).

Lo anterior fue con el fin de identificar un referente de valores diferenciados entre los obtenidos con cada uno de los métodos de análisis, con el propósito de establecer cuál podría aplicarse con mayor precisión a las condiciones climáticas locales de Ensenada.

La RLS es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables, éste puede utilizarse para explorar y cuantificar la relación entre una variable dependiente y una variable independiente, así como para desarrollar una ecuación lineal con fines predictivos [49].

Por su parte, el MIST utiliza la estadística descriptiva para la estimación de un valor neutral de temperatura. La diferencia fundamental con el método de RLS es que antes de obtener la línea de regresión que caracteriza a la muestra estudiada, se determinan grupos o estratos de la misma para calcular el valor promedio y la desviación estándar (DS) de cada una de ellos con el objetivo de determinar el valor medio de temperatura de todas las respuestas de

cada categoría. De esa manera, la regresión no se hace con todos los pares de datos de la muestra, sino sólo con los valores medios y los rangos se establecen mediante la adición y sustracción de una o dos veces la DS de la muestra [10], [11].

### 3. Resultados

Durante el análisis y el procesamiento de datos no hubo distinción de edad, género, actividad metabólica o nivel de arropamiento en los sujetos evaluados, a fin de estimar valores genéricos aplicables a la población general de la ciudad de Ensenada.

Si bien, estas variables tienen influencia en la percepción térmica de los sujetos, las variables con mayor impacto son las relacionadas con el ambiente térmico, de acuerdo con la ANSI ASHRAE 55 [6] y la ISO 7730 [5], por lo que los valores aquí presentados refieren a la estimación obtenida con la correlación de la ST y la TGN, la TBS, la HR y la VV, respectivamente.

El total de observaciones recabadas fueron 425, de las cuales solo se procesaron 377; la diferencia se debió a la diversidad de condiciones ambientales en las que se recabaron respecto a las requeridas para el procesamiento reportado en esta publicación.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por variable física analizada y por método estadístico utilizado. Para efectos de eficientar la extensión del artículo, únicamente se muestra el procesamiento de datos aplicado sobre la variable ambiental que mostró mayor influencia en la percepción térmica de los sujetos, la TGN. En el resto de las variables físicas analizadas fue llevado a cabo el mismo procedimiento, sin embargo, en esta sección solo se incluyen los gráficos resumen de resultados.

#### 3.1. Índice de confort térmico por TGN

De acuerdo con los resultados obtenidos con la correlación realizada por el método de Medias por Intervalos de Sensación Térmica (MIST), el valor de neutralidad de la TGN respecto a la ST percibida por los sujetos resultó en **25,4 °C**, el rango de confort reducido se estimó de **22,8 °C a 27,8 °C** con un intervalo de 5,0 K, y, el rango de confort extenso se estimó de **19,7 °C a 29,8 °C** con un intervalo de 10,1 K.

La categoría que reflejó un grado mayor de adaptación psicofisiológica por parte de los sujetos, fue la cuarta (ni calor, ni frío), teniendo un valor de DS superior a las demás de forma significativa. Desde la quinta categoría hasta la séptima, se obtuvieron valores aproximados entre sí, con DS de 2,0 y 2,5. La segunda y tercera categoría, obtuvieron valores de DS por debajo de las anteriores, siendo de 1,2 y 1,8 respectivamente (Figura 6).

La regresión lineal media resultó con una  $r^2$  de 0,9626, lo que equivale a una correlación de variables muy alta, teniendo certeza en la concentración de respuestas (muestra no dispersa) [50].

Por su parte, con el procesamiento obtenido por el método de la regresión lineal simple (RLS), el valor neutral de la TGN resultó en **24,1 °C**, los límites inferior y superior del confort fueron de **16,7 °C y 31,5 °C** respectivamente, con un intervalo de 14,8 K.

El grado de correlación entre los puntos de dispersión y la recta de regresión es baja, dado que la  $r^2$  fue de 0,1067, teniendo un alto grado de dispersión en la muestra analizada [50] (Figura 7).

**SENSACIÓN TÉRMICA – TEMPERATURA DE GLOBO NEGRO: SEPTIEMBRE Y OCTUBRE**

Observaciones procesadas: 377 ( 201 de mujeres y 176 de hombres) Nivel de actividad: 3 niveles

SENSACIÓN TÉRMICA	TEMPERATURA DE GLOBO NEGRO							RSTP
	ESCALA	DS	-2DS	-1DS	MEDIA	+1DS	+2DS	
Mucho Calor	7	2,0	27,4	29,4	31,5	33,5	35,6	4
Calor	6	2,5	23,7	26,3	28,8	31,3	33,8	14
Algo de Calor	5	2,0	22,4	24,4	26,4	28,4	30,4	81
Ni Calor, Ni frío	4	5,2	14,5	19,7	25,0	30,2	35,4	189
Algo de Frío	3	1,8	20,0	21,8	23,6	25,4	27,2	81
Frío	2	1,2	20,3	21,5	22,7	23,9	25,1	8
Mucho Frío	1	-	-	-	-	-	-	0

Neutral	19,7	22,8	25,4	27,8	29,8
Amplitud	5,7	2,6	(+)	2,4	4,4
Rango reducido	↔		5,0 K	↔	
Rango extenso	↔		10,1K	↔	

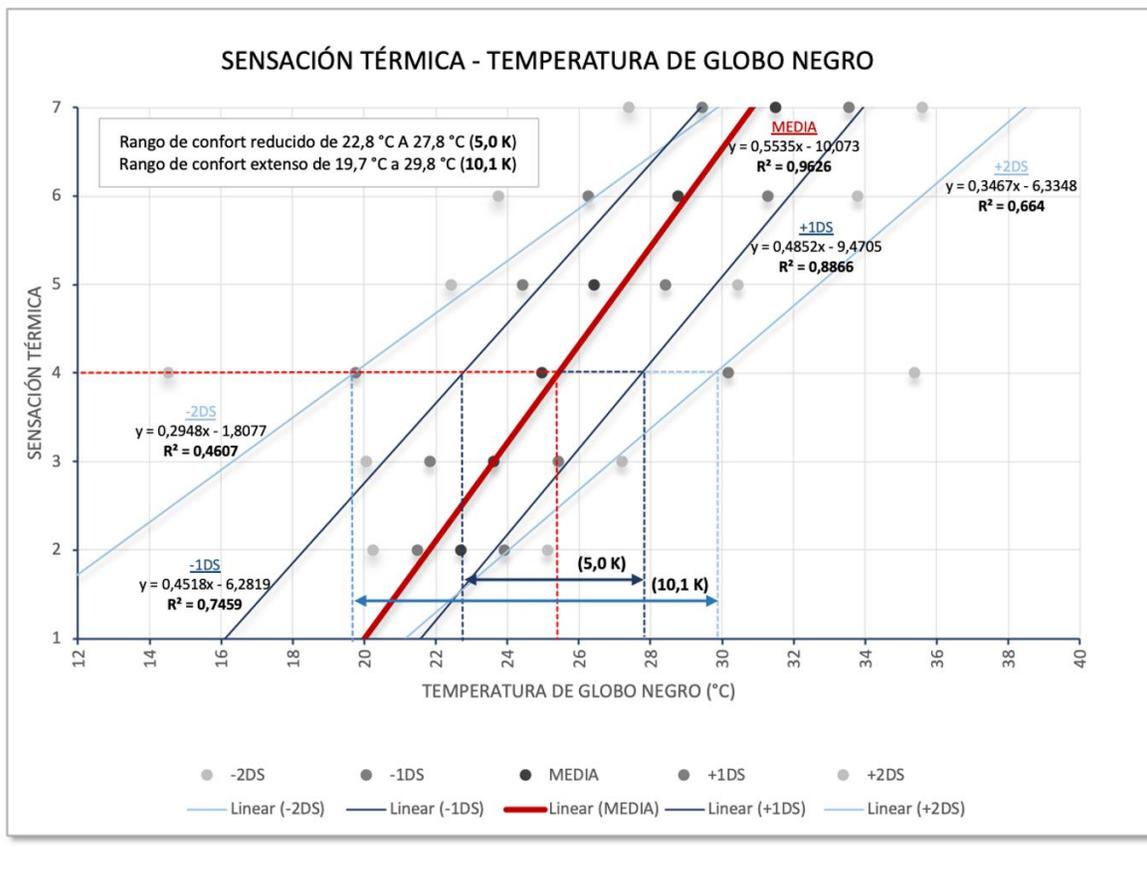


Figura 6. Análisis correlacional de la ST y la TGN a partir del MIST. Fuente: Elaboración propia.

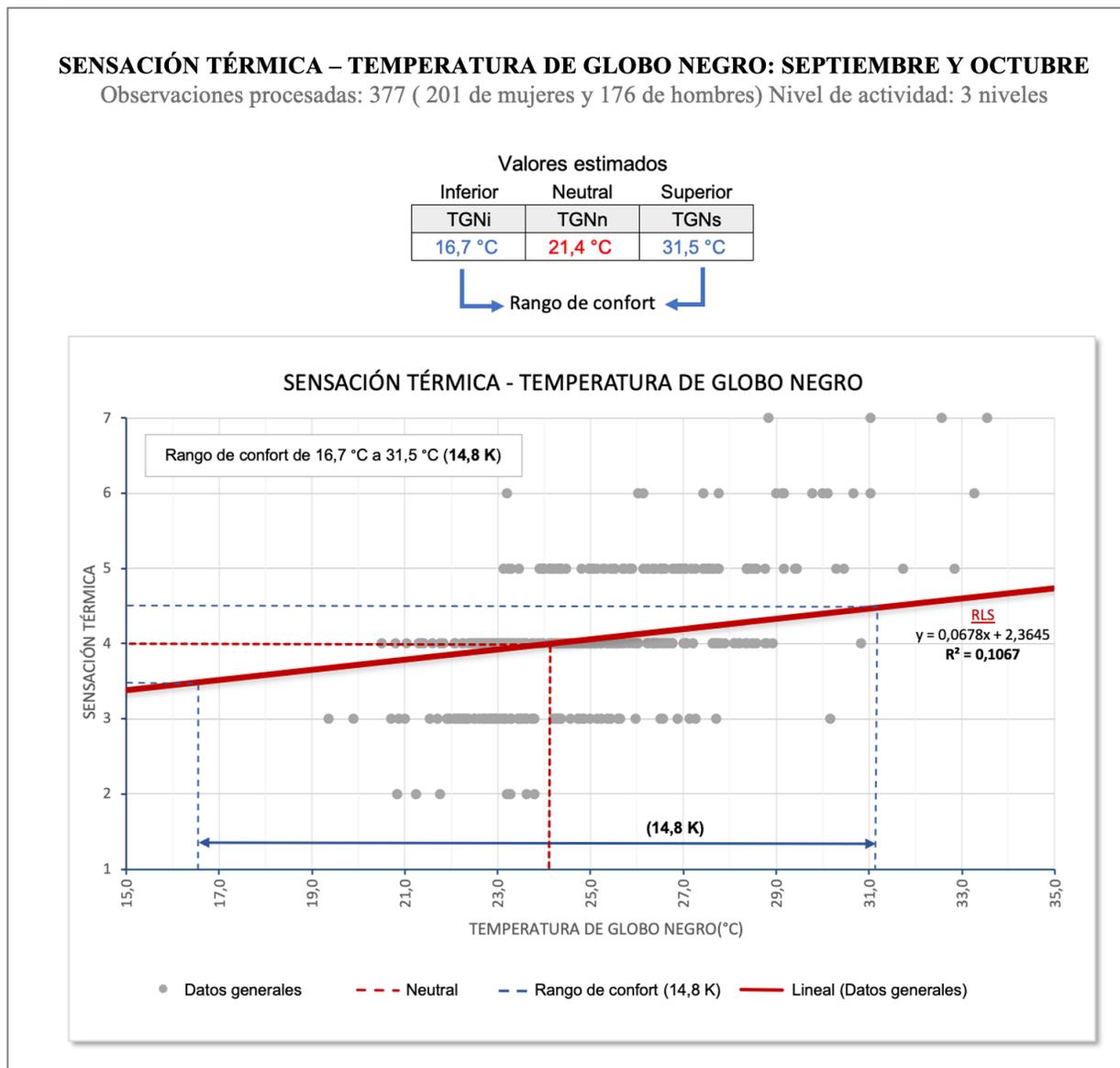


Figura 7. Análisis correlacional de la ST y la TGN a partir de la RLS. Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo expuesto anteriormente, en ambos métodos se muestra mayor adaptación a temperaturas altas (por encima del valor neutral) y menor adaptación a temperaturas por debajo de 16,7 °C (tendiente a lo frío), por lo que se aprecia una relación, ya que los límites superiores se encontraron cercanos entre sí, con 29,8 °C en el MIST y 31,5 °C en la RLS, además de que se mostró proximidad en los valores neutrales obtenidos, siendo de 25,4 °C en el MIST y de 24,1 °C en la RLS con una diferencia de 1,3 K (Figura 8).

### 3.2. Índice de confort térmico por TBS

De acuerdo con los resultados obtenidos con la correlación realizada por el método del MIST, la estimación del valor de neutralidad de la TBS respecto a la ST percibida por los sujetos resultó en 22,2 °C, el rango de confort reducido se estimó de 20,7 °C a 23,7 °C con un intervalo de 3,0 K, y, el rango de confort extenso se estimó de 19,2 °C a 25,1 °C con un intervalo de 5,9 K.

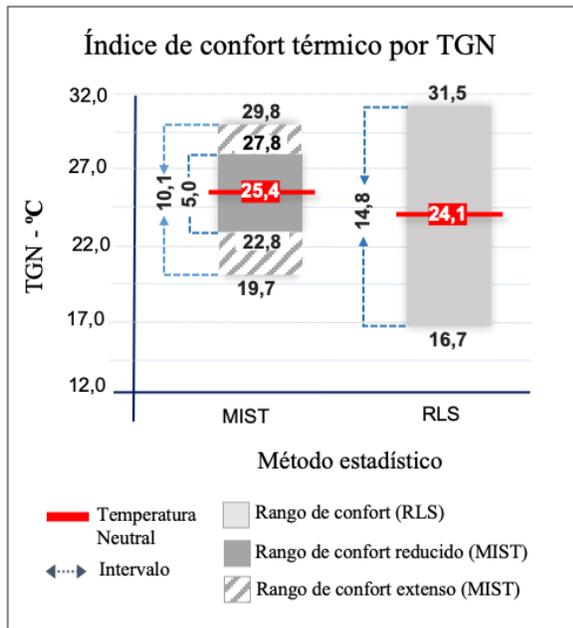


Figura 8. Índice de confort térmico por TGN. Fuente: Elaboración propia.

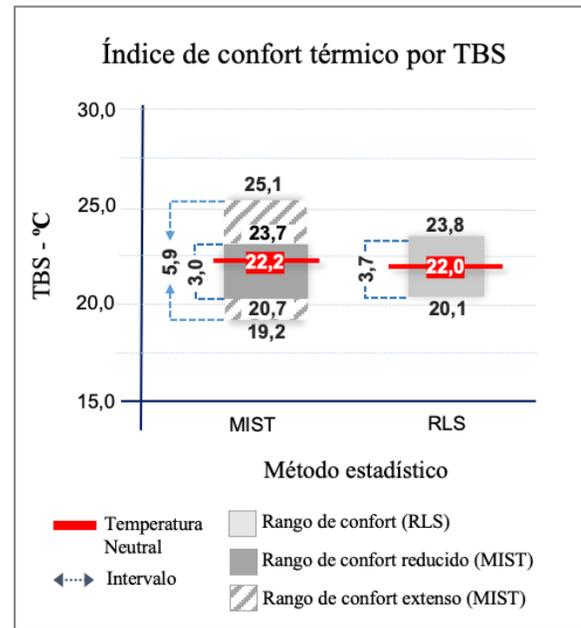


Figura 9. Índice de confort térmico por TBS. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al procesamiento realizado con la RLS, el valor neutral de la TBS resultó de **22,0 °C**, los límites inferior y superior del rango de confort fueron de **20,1 °C** y **23,8 °C** respectivamente, con un intervalo de 3,7 K.

Los resultados estimados en ambos métodos fueron congruentes entre sí, ya que se obtuvieron valores próximos, tanto en la temperatura neutral ( $T_n$ ), ya que fueron de 22,2 °C en el MIST y de 22,0 °C en la RLS, así como en el rango de confort térmico de la RLS con respecto al rango reducido del MIST, siendo de 23,8 °C a 20,1 °C y de 23,7 °C a 20,7 °C respectivamente (Figura 9).

Los rangos de confort térmico estimados con ambos métodos se encuentran dentro de las temperaturas promedio presentadas típicamente en el ambiente, con una temperatura mínima de 17,3 °C y una máxima de 24,9 °C [43], a excepción del límite de temperatura superior del rango extenso del MIST, ya que es de 25,1 °C.

### 3.3. Índice de confort térmico por HR.

Con el método estadístico del MIST, fue posible estimar el valor de neutralidad de la HR respecto a la ST percibida por los sujetos, siendo de **68,6 %**, el rango de confort reducido se estimó de **61,3 %** al **75,9 %** con un intervalo de 14,6 %, y, el rango de confort extenso se estimó de **54,3 %** al **83,6 %** con un intervalo de 29,3 % (Figura 10).

Respecto a los resultados de la correlación de la ST con la HR obtenidos con la RLS, el valor neutral fue de **76,2 %**, los límites inferior y superior del confort fueron de **0,1 %** a **99,9 %** con un intervalo de 99,8 %.

Basándose en los valores derivados de ambos métodos, se obtuvieron mejores resultados con el MIST ya que el rango de confort resultante con la RLS va desde el valor mínimo hasta el máximo de HR (de 0,01%–99,9%), dado que los límites inferior y superior, desde el punto de vista estadístico, quedaban fuera de la escala de la variable analizada (0,0 %–100,0 %), por lo

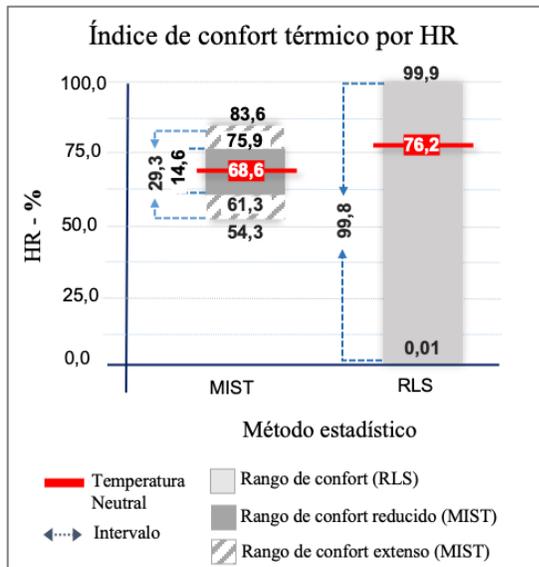


Figura 10. Índice de confort térmico por HR. Fuente: Elaboración propia.

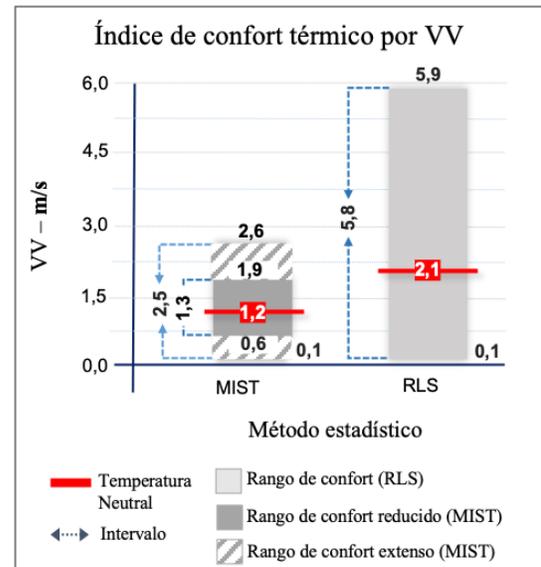


Figura 11. Índice de confort térmico por VV. Fuente: Elaboración propia.

que indicaría que en todo momento se tiene tolerancia a la humedad, lo cual resulta incierto.

### 3.4. Índice de confort térmico por VV.

A partir de la correlación realizada con el método del MIST, se estimó el valor de neutralidad de la VV respecto a la ST percibida por los sujetos en **1,2 m/s**, el rango de confort reducido se estimó de **0,6 m/s a 1,9 m/s** con un intervalo de 1,3 m/s, y, el rango de confort extenso se estimó de **0,1 m/s a 2,6 m/s** con un intervalo de 2,5 m/s

Referente a la correlación de la VV con la ST llevada a cabo con la RLS, el valor neutral resultó de **2,1 m/s**, los límites inferior y superior del confort fueron de **0,1 m/s** y **5,9 m/s** respectivamente, con un intervalo de 5,8 m/s (Figura 11).

En función a lo anteriormente expuesto, se percibe que con el MIST se obtuvo mayor consistencia en los resultados, ya que el límite superior del rango de confort con la RLS (5,9 m/s) resultó por encima de las condiciones de viento presentadas en el estudio.

Los límites inferiores en ambos métodos resultaron con un valor negativo, sin embargo, dado a que en la realidad no existen valores negativos de viento, el valor mínimo estimado se tomó de 0,1 m/s y no el obtenido estadística y gráficamente.

## 4. Discusión

Para abordar este apartado, se tomaron como referencia dos trabajos sobre el confort térmico en espacios exteriores, a fin de que los resultados obtenidos en este artículo puedan ser discutidos en el contexto de otras investigaciones. Para seleccionar dichos trabajos, estos debían contar con ciertas similitudes con las de este trabajo, por ejemplo: el periodo de estudio, la metodología utilizada, la estimación de los rangos de confort térmico de alguna de las variables físicas del ambiente consideradas en este estudio (TGN, TBS, HR y VV), cercanía con la región geográfica del caso de estudio, entre otras.

Las investigaciones seleccionadas fueron:

1. “Confort térmico en exteriores: actividades en espacios recreativos, en clima cálido seco extremoso” realizada en Mexicali, Baja California por Bojórquez en el 2010 [3].
2. “Confort térmico en los espacios públicos urbanos, clima cálido y frío semi-seco” llevada a cabo en Nogales, Sonora por Guzmán y Ochoa en el 2014 [4].

Ambas investigaciones fueron realizadas en el periodo cálido, y llevadas a cabo mediante la aplicación de encuestas subjetivas y la medición simultánea de las variables climáticas, la estimación se realizó mediante la correlación de las variables físicas registradas y la sensación térmica percibida por los sujetos de estudio con el método estadístico MIST. En la primera, se obtuvieron los valores neutrales y los rangos de confort térmicos reducidos y extensos de la TGN, la TBS, la HR y la VV (al igual que en esta investigación), sin embargo, la segunda investigación solo presenta los resultados de la TBS, por lo tanto, fue esta la variable que se utilizó para el análisis y discusión.

En cuanto a la ubicación geográfica, las tres ciudades se sitúan en el noroeste de México, y sus estados se encuentran en colindancia terrestre entre sí. Cabe mencionar que Baja

California y Sonora se encuentran en la segunda zona árida de la República Mexicana, la cual cuenta con poca precipitación, ya que, en gran parte de su extensión, el promedio anual de la lluvia es menor de 200 mm y en ciertas áreas no llega a 50 mm [51].

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de la temperatura neutral (Tn) y los rangos de confort reducido y extenso de la TBS, de los estudios del confort térmico en espacios exteriores realizados en Ensenada, B.C. (los valores agregados corresponden a los estimados con el MIST), Mexicali, B.C., y Nogales, Sonora.

Los valores obtenidos en Mexicali muestran una mayor adaptación a temperaturas altas, con respecto a los valores estimados en Ensenada y Nogales, lo cual resulta natural debido a que el intervalo de temperatura ambiente promedio que se da en dicha ciudad, en el periodo cálido, se encuentra de 25 °C a 42 °C [52], lo cual indica que las personas que habitan ésta localidad se encuentran constantemente expuestas a condiciones cálidas, por lo que han desarrollado mayor adaptación a éstas, lo anterior confirma que, de acuerdo con Brager y de Dear, la sensación térmica que una persona presenta varía según su localidad, su estado sociocultural y de persona a persona [13].

**Tabla 2.** Valores estimados de Tn y rangos de confort térmico de la TBS a partir de la correlación con la ST con el MIST.

Ciudad	Bioclima	Rangos de confort térmico		Temperatura neutral (Tn)
		Reducido	Extenso	
Ensenada, B.C.	Templado-seco	20,7 °C – 23,7 °C	19,2 °C – 25,1 °C	22,2 °C
Mexicali, B.C. [3]	Seco-extremoso	30,5 °C – 38,2 °C	26,7 °C – 42,1 °C	34,4 °C
Nogales, Sonora [4]	Semiseco-templado	24,0 °C – 27,2 °C	22,2 °C – 28,8 °C	25,8 °C

Fuente: Elaboración propia.

El intervalo promedio de temperatura en Nogales, en el periodo de estudio, es de 18 °C

a 34°C [53], y en Ensenada de 17,3 °C a 24,9 °C [43], la primera presenta una

magnitud mayor de temperatura sobre la máxima de la segunda, mientras que las mínimas, en ambos casos, se encuentran próximas, lo anterior indica que Nogales presenta condiciones más cálidas que Ensenada.

Los rangos estimados de confort térmico en Nogales se encuentran con mayor adaptación a temperaturas altas que los de Ensenada, así mismo con los valores de  $T_n$ .

Por lo mencionado anteriormente, se asume que la población de Ensenada, muestra mayor adaptación hacia temperaturas bajas (tendientes a lo frío) con respecto a Mexicali y a Nogales en el periodo cálido, lo cual se debe a grandes rasgos, a la proximidad que la ciudad tiene con respecto al mar y a las variaciones que esto podría generar en los parámetros de las variables físicas del ambiente, tales como la VV y la HR, ya que en Ensenada, en el periodo de estudio, la HR registrada fue de 65,3 % a 92,8 %, con una VV de 0,1 m/s a 4,7 m/s, mientras que en Nogales la HR fue de 19,9 % a 68 %, la VV de 0,1 m/s a 3,5 m/s, y, en Mexicali la HR fue entre 30 % y 65% y la VV de 0,2 m/s a 1,0 m/s [3], [4].

## **5. Confort térmico por factores endógenos**

Con el fin de identificar el grado de influencia que ciertos factores endógenos de la muestra poblacional estudiada ejercieron sobre la sensación térmica de los sujetos y, por ende, sobre su confort térmico, en este apartado se muestran los valores térmicos obtenidos a partir del análisis generado con la subclasificación de la base de datos por nivel de actividad metabólica, nivel de aislamiento térmico por arropamiento y género. En este sentido, y con el propósito de mostrar los valores térmicos que mayor representatividad reflejaron sobre el confort térmico de las

personas, los valores aquí presentados derivan específicamente de la correlación de la Sensación Térmica y la Temperatura de Globo Negro, realizada a partir del método de Medias por Intervalos de Sensación Térmica, método que mostró valores con mayor causalidad respecto a las condiciones propias del sitio de estudio.

### *5.1. Confort térmico por nivel de actividad*

Con base en el análisis realizado con los diferentes niveles de actividad, es posible notar la variación en la estimación del confort térmico en espacios exteriores, donde la submuestra (87 sujetos) que realizaba una actividad moderada (1,2 met, en promedio) presentó parámetros de confort más reducido (7,7 K) respecto a la submuestra que realizaba una actividad pasiva (1,0 met, en promedio), debido a la actividad metabólica y la generación de calor del cuerpo en un ambiente térmico ligeramente caluroso con mayor TNG, cuya  $T_n$  varió muy poco, entre los 24,9 a 25,5 K, que causó un incremento de la temperatura corporal y menores pérdidas.

Conforme disminuye la generación de calor corporal por una actividad pasiva o en reposo, la evaluación de 188 sujetos logró ampliar su rango de confort extenso respecto a su ambiente inmediato a 9,9 K. Esto es, entre mayor actividad metabólica presenta la submuestra evaluada, la amplitud del rango de confort térmico es más reducida y se presenta con valores tendientes a temperaturas frías (o inferiores a las temperaturas promedio estimadas con las submuestras con actividad metabólica inferior).

Cabe destacar que el análisis con los 3 niveles de actividad (376 evaluaciones) estimó un rango de confort térmico de 10,1 K, presentando un mínimo de diferencia con

respecto a la actividad pasiva y, en cuyo caso, el rango de confort térmico reducido fue el mismo con 5,0 K. No se presentaron casos de actividad metabólica intensa (Figura 12).

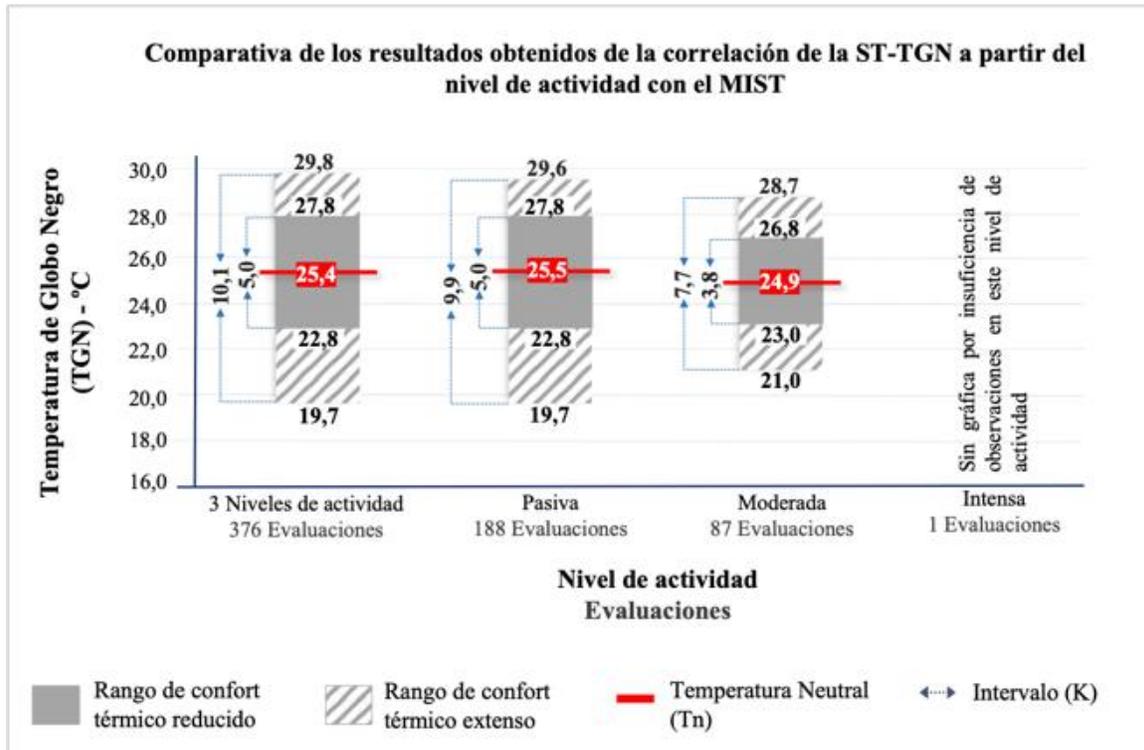


Figura 12. Estimación y comparación del confort térmico a partir del nivel de actividad presentada por la muestra evaluada. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2. Confort térmico por nivel de arropamiento

Para el análisis comparativo del nivel de arropamiento, se contemplaron 5 niveles, dentro de los cuales el muy ligero con 16 evaluaciones, el ligero con 181 y el normal con 152, obtuvieron un rango de confort térmico extenso muy parecido, dentro de los 7,2 K y 7,3 K; en tanto, el rango reducido del nivel de arropamiento muy ligero y normal fue muy similar, 3,7 y 3,6 K, respectivamente, destacando este rango reducido para el arropamiento ligero que alcanzó los 5,3 K. Por último, se procesaron 25 valoraciones para sujetos abrigados, donde fue clara la disminución del rango de confort, permitiendo

apreciar que, a mayor nivel de arropamiento, aumenta el aislamiento con el ambiente exterior reduciendo el contacto con el mismo, así como el intercambio de calor, una reducción del rango de confort, tanto extenso como reducido, dependiendo de factores endógenos. La Tn del valor de TGN fluctuó ligeramente de 24,2 a 25,5 °C, donde la mayor amplitud de confort se obtuvo al agrupar los 5 niveles de arropamiento con 10,1 k para el rango extenso y 5,0 K para el reducido (Figura 13).

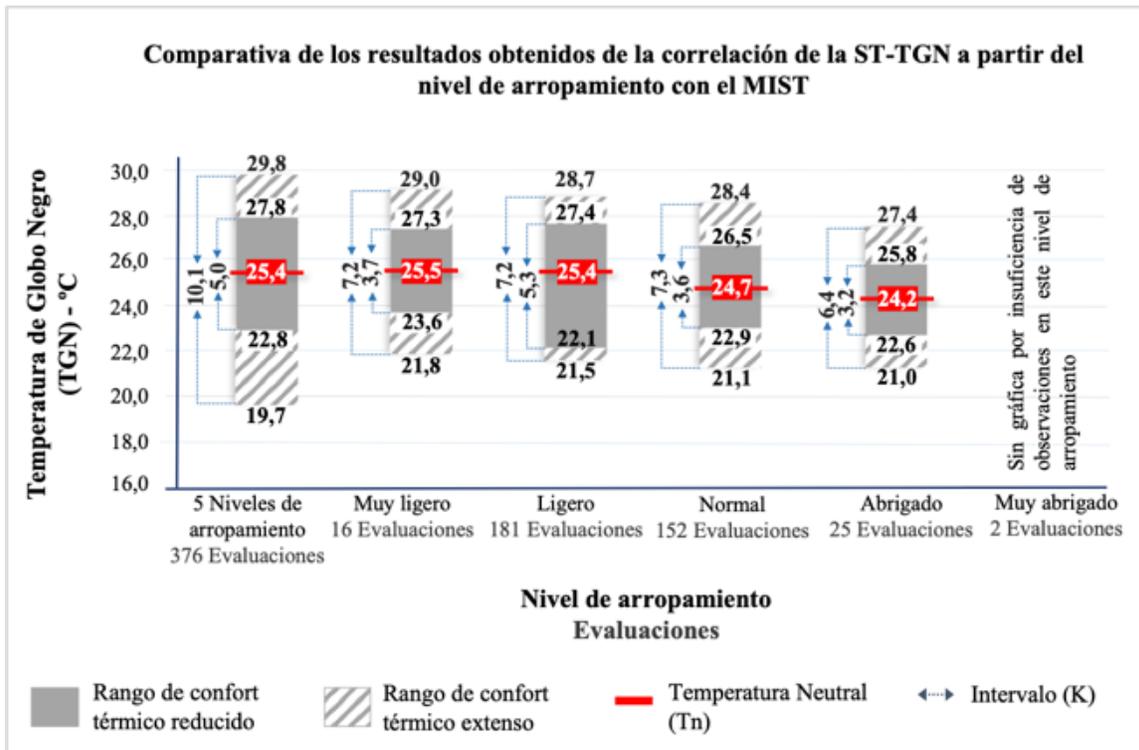


Figura 13. Estimación y comparación del confort térmico a partir del nivel de arropamiento presentado por la muestra evaluada. Fuente: Elaboración propia.

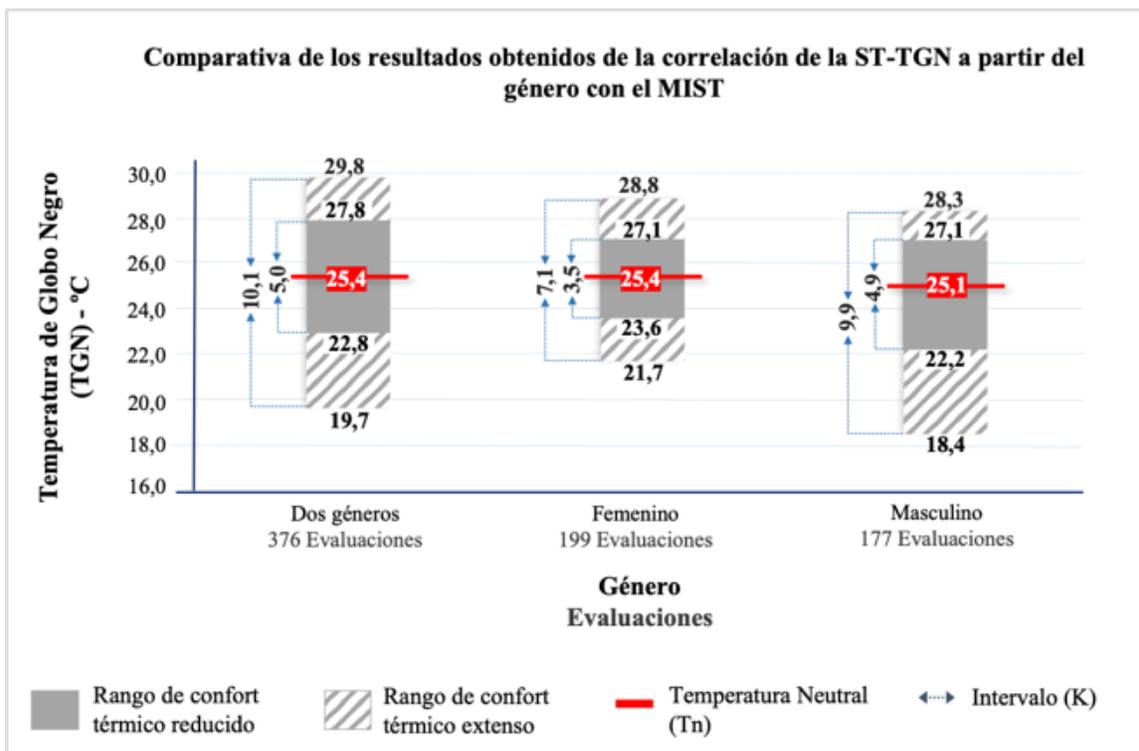


Figura 14. Estimación y comparación del confort térmico a partir del género de la muestra evaluada. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. Confort térmico por género

El confort térmico estimado a partir del género de los sujetos evaluados se estimó con una Tn de TGN muy parecida, 25,4 °C para mujeres (199 evaluaciones) y 25,1 °C para hombres (177 evaluaciones). En este caso, el rango térmico de confort para el género femenino fue mucho menor, con un rango extenso de 7,1 K y reducido de 3,5 K, mientras que para el género masculino se obtuvo un rango extenso de 9,9 K y reducido de 4,9 K, lo cual concuerda con los requerimientos energéticos de la mujer ligeramente menores al hombre, lo que deriva en una disminución de la generación de calor, siendo éstas más vulnerables a las ganancias o pérdidas de calor con el ambiente térmico exterior y reduciendo su respuesta de percepción de confort. De igual modo, al conjuntar ambos géneros el resultado fue también un rango extenso de 10,1 K y reducido de 5,0 K como en los casos anteriores (Figura 14).

## 6. Conclusiones

Los sitios elegidos para realizar el estudio, dentro de la U.A.B.C. campus Sauzal, resultaron apropiados para el desarrollo de la investigación ya que cumplen con los criterios de espacios exteriores de uso público en cuanto a su dimensión ambiental, por lo que los resultados no son exclusivos para la institución educativa, sino que podrían extrapolarse a otros casos de estudio de características y condiciones similares dentro de la ciudad de Ensenada.

Es de destacar las mejoras implementada a la metodología para la estimación del confort térmico en exteriores, con la toma de datos a 3 alturas del instrumental para la lectura de variables físicas (N+0.10, N+1.10 y N+1.70), así como el alentar al encuestado y la confiabilidad de respuesta a través de la aplicación de un cuestionario sintetizado,

apegado a sensación y preferencia térmica de variables físicas de relevancia para el estudio, así como el diseño de una herramienta gráfica amigable, todas ellas aportaciones que permiten tener registro de información más precisa.

Uno de los principales hallazgos de este artículo, es que se están estimando rangos de confort térmico con todas las variables ambientales de manera independiente, por dos distintos métodos estadísticos, con la obtención de valores simultáneos calculados por MIST Y RLS, realizando un análisis comparativo y permitiendo mayor claridad para definir su grado de importancia en la estimación de variables físicas en el ambiente térmico.

La influencia que cada una de las variables registradas representó sobre la ST percibida de los sujetos, en orden jerárquico, fue la siguiente:

- a) TGN (con una  $r^2$  de 0,3490);
- b) TBS (con una  $r^2$  de 0,2911);
- c) HR (con una  $r^2$  de 0,0012); y,
- d) VV (con una  $r^2$  de 0,0006)

Lo anterior podría resultar natural si nos enfocamos al hecho de que las evaluaciones fueron realizadas en ambientes exteriores, por lo que, la TGN representa mayor influencia respecto al resto de variables registradas.

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos con el MIST y la RLS, fue posible apreciar que, con la RLS, tanto con la HR como con la VV, los valores obtenidos no derivan de una correlación causal o fenomenológica, lo que implica que los resultados podrían no corresponder con las condiciones presentadas en el sitio e incluso estimar rangos de confort abarcando desde el valor mínimo hasta el máximo de la escala de valores de la variable individual.

Por lo anteriormente presentado, se asume que el método estadístico de Regresión Lineal Simple no podría considerarse del todo certero para llevar a cabo estudios de este tipo (confort térmico en exteriores) en cuanto a la Humedad Relativa y a la Velocidad de Viento se refiere, dado que los resultados estimados son ajenos a las condiciones reales presentadas en el ambiente.

El método de Medias por Intervalo de Sensación Térmica ofreció valores congruentes con las condiciones típicas que dan lugar de forma natural en el sitio, lo que permite entrever la relación fenomenológica que éste presenta respecto a condiciones reales de estudio.

Los rangos ambientales obtenidos para Ensenada correspondieron a las condiciones que de manera natural se presentan en el periodo cálido, mismo caso se dio en los estudios de Mexicali y Nogales, ya que la sensación térmica percibida por las personas varía dependiendo de la localidad [13], lo anterior se debe a que, de acuerdo de la ubicación geográfica, cambian los factores del clima que influyen en la ST, tales como la humedad y el viento.

Por último, en la Tabla 3 se presenta un resumen de los indicadores de confort térmico estimados a partir de la correlación de la ST y cada una de las variables físicas analizadas (TGN, TBS, HR y VV), a partir de los dos métodos estadísticos univariados de correlación de datos utilizados: MIST y RLS.

**Tabla 3.** Indicadores de confort térmico estimados a partir de la correlación de la ST con la TBS, la TGN, la HR y la VV por método estadístico aplicado.

Variable	Unidad	Rango de confort térmico		
		MIST		RLS
		Rango de Reducido	Extenso	
<b>TBS</b>	°C	20,7 a 23,7	19,2 a 25,1	20,1 a 23,8
<b>TGN</b>	°C	22,8 a 27,8	19,7 a 29,8	16,7 a 31,5
<b>HR</b>	%	61,3 a 75,9	54,3 a 83,6	0,01 a 99,9
<b>VV</b>	m/s	0,6 a 1,9	0,1 a 2,6	0,1 a 5,9

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, al desarrollar el análisis a partir de la estratificación de la base de datos por nivel de actividad, grado de arropamiento y género, fue posible concluir que el confort térmico en todos los casos se estimó con mayor amplitud hacia temperaturas por debajo de la de confort que por encima de ésta, lo que resulta natural al visualizar que las condiciones climáticas del sitio de estudio son predominantemente frías a lo largo del año, permitiendo advertir la influencia del historial térmico que las personas presentan

en este caso. Asimismo, es posible concluir que:

- Con base en el análisis por nivel de actividad: La influencia del calor interno con la actividad moderada se hace presente al obtenerse rangos de confort térmico con menor amplitud respecto al obtenido con el resto de actividades o, en su caso, con el total de ellas. Cabe mencionar que la submuestra analizada con esta actividad representa al 23 % de la muestra total estudiada, lo que

permite advertir la predominancia de actividades pasivas en espacios exteriores en el caso de estudio: Leer, convivir, platicar, estudiar, caminar, descansar, etc., equivalentes a un rango de 1,0 a 1,2 met.

En general, la temperatura neutra en todos los casos se muestra próxima entre sí, lo que varía es la amplitud de los rangos de confort quienes se ajustan en función de la actividad desarrollada por la submuestra analizada.

- Con base en el análisis por nivel de arropamiento: El confort térmico es diferente entre sí (tanto en la temperatura neutra como en el rango de confort) con los diferentes niveles de arropamiento analizados; sin embargo, se aprecia una clara tendencia a valores térmicos mayores en tanto el grado de arropamiento es inferior, y a valores térmicos inferiores en tanto el nivel de arropamiento es mayor, fenómeno natural dada la acción de aislamiento térmico que las diferentes prendas ejercen sobre el cuerpo humano para lograr la adaptación al ambiente inmediato en el menor tiempo posible.

En este caso, la mayor cantidad de sujetos evaluados se concentran en los niveles de arropamiento ligero y normal, equivalentes a 0,4 y 0,7 clo, respectivamente, lo que permite advertir el grado de vestimenta que los sujetos portan durante el periodo cálido en el sitio de estudio a efecto de adaptarse a las condiciones térmicas predominantes en ese periodo en espacios exteriores.

- Con base en el análisis por nivel de arropamiento: La temperatura neutra prácticamente presenta el mismo valor tanto en mujeres como en hombres o, en su caso, con el análisis obtenido con ambos géneros; la diferencia radica en la amplitud de los rangos de confort en donde es posible visualizar una más estrecha (7,1 K) en el confort térmico de las mujeres, que en el de los hombres (9,9 K), dada la complejidad física que cada uno de ellos presenta. No obstante, es de destacar que el confort térmico de las mujeres (21,7 a 28,8 °C) tiende a temperaturas mayores que las sugeridas para los hombres (18,4 a 28,3 °C), lo que permite advertir la influencia biológica y fisiológica del ser humano sobre el confort térmico de las personas; sobre todo, porque en este caso, particularmente, la cantidad de sujetos evaluados en cada una de las submuestras, según el género (mujeres-hombres), es equivalente.

## 7. Agradecimientos

Esta publicación forma parte de la línea de investigación de Confort Térmico del proyecto denominado *Estudios del potencial térmico del suelo de Ensenada dirigido a la implementación de estrategias de acondicionamiento pasivo*, financiado al UABC-CA-300 *Arquitectura, medio ambiente y energía* por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el Tipo Superior (PRODEP), con IDCA 28903, en el marco de la convocatoria 2018 Apoyo para el fortalecimiento de los CA, a quien se le reconoce y agradece los apoyos económicos para llevarlo a cabo.

Asimismo, se extiende el agradecimiento a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por brindar las facilidades de

acceso y recurso humano para el desarrollo de los trabajos de campo en las diferentes instalaciones de su unidad Sauzal.

## 8. Reconocimiento de autoría

López-Cañedo, J.: Conceptualización, Software, Validación, Análisis formal, Investigación, Curación de datos, Escritura (borrador original). Rincón-Martínez, J.: Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis formal, Recursos, Curación de datos, Escritura (revisión y edición). Fernández-Melchor, F.: Análisis formal, Escritura (revisión y edición).

### Referencias

- [1] M. Nikolopoulou, «Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach.» *Centre for Renewable Energy Sources*, 2004.
- [2] M. Nikolopoulou y S. Lykoudis, «Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries.» *Building and Environment*, vol. 41, n° 11, pp. 1455-1470, DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.031, 2006.
- [3] G. Bojórquez, Confort térmico en exteriores: Actividades en espacios recreativos, en clima cálido seco extremo., Tesis doctoral. Universidad de Colima, Facultad de Arquitectura y Diseño. Colima, 2010.
- [4] F. Guzmán Bravo y J. Ochoa De la Torre, «Confort Térmico en los Espacios Públicos Urbanos, Clima cálido y frío semi-seco.» *Revista Hábitat Sustentable*, vol. 4, n° 2, pp. 52-63, <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/450>, 2014.
- [5] International Organization for Standardization., ISO 7730:2005 (E) Ergonomics of the thermal environment - analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria., Ginebra: Autor, 2005.
- [6] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ANSI/ASHRAE Standar 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, 2017.
- [7] M. Portela Santiago, A. Guevara Velazco y A. León Lee, «Cálculo y Terminología de las Sensaciones Térmicas en el pronóstico del tiempo para Cuba.» *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 7, n° 1, pp. 30-33, 2000.
- [8] S. Szokolay, Introduction to Architectural Science: The basis of sustainable desing, London: Architectural Press, Elsevier, 2003.
- [9] M. Nikolopoulou y K. Steemers, «Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces.» *Energy and Buildings*, vol. 35, n° 1, pp. 95-101, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1), 2003.
- [10] G. Gómez-Azpeitia, R. Ruiz y G. y. R. R. Bojórquez, «Monitoreo de Condiciones de Confort Térmico, Reporte Técnico (Producto 3).» CONAFOVI 2004-01-20, Comisión Nacional del Fondo para Vivienda, Proyecto Confort Térmico y Ahorro de Energía en la Vivienda Económica en México, Regiones de Clima Cálido Seco y Húmedo, Colima, México, 2007.
- [11] M. Humphreys y F. Nicol, «Understanding the adaptative approach to thermal comfort.» *ASHRAE Transactions, Technical Bulletin.*, vol. 104, n° 1, pp. 991-1004. Atlanta: ASHRAE, 1998.
- [12] H. Critchfield, Climate and human comfort, General Climatology. London: Prentice-Hall, 1974.
- [13] G. Brager y R. de Dear, «Thermal adaptation in the built environment: a literature review.» *Energy and Buildings*, vol. 27, n° 1, pp. 83-96, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4), 1998.
- [14] E. Thom, «The Discomfort Index.» *Weatherwise*, vol. 12, n° 2, pp. 57-61, 1959.
- [15] R. Steadman, «The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science.» *J. Appl. Meteorol.*, vol. 18, pp. 861-873, DOI:

- [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2), 1979.
- [16] R. Steadman, «Indices of Windchill of Clothed Persons,» *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, vol. 10, n° 4, pp. 674-683, <https://www.jstor.org/stable/26175675>, 1971.
- [17] P. O. Fanger, «Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering,» *Danish Technical Press, Copenhagen*, 1970.
- [18] H. Mayer y P. Höppe, «Thermal comfort of man in different urban environments,» *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 38, n° 1, pp. 43-49, <https://doi.org/10.1007/BF00866252>, 1987.
- [19] R. de Dear y J. Pickup, «an Outdoor Thermal Comfort Index (Out-Set\*) -Part I—the Model and Its Assumptions,» *15th ICB & ICUC*, pp. 1-7, <https://www.researchgate.net/publication/268983313>, 1999.
- [20] G. Jendritzky, R. de Dear y G. Havenith, «UTCI—Why another thermal index?,» *International Journal of Biometeorology*, vol. 56, n° 3, pp. 421-428, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>, 2012.
- [21] I. Knez y S. Thorsson, «Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square,» *International Journal of Biometeorology*, vol. 50, n° 5, pp. 258-268, <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0024-0>, 2006.
- [22] S. Manavvi y E. Rajasekar, «Evaluating outdoor thermal comfort in “Haats” – The open air markets in a humid subtropical region,» *Building and Environment*, vol. 190, n° August 2020, pp. 107527, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107527>, 2021.
- [23] S. S. Y. Lau, J. Zhang y Y. Tao, «A comparative study of thermal comfort in learning spaces using three different ventilation strategies on a tropical university campus,» *Building and Environment*, vol. 148, n° August 2018, pp. 579-599, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.032>, 2019.
- [24] M. Trebilcock, J. Soto-Muñoz y J. Piggot-Navarrete, «Evaluation of thermal comfort standards in office buildings of Chile: Thermal sensation and preference assessment,» *Building and Environment*, vol. 183, pp. 107158, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107158>, 2020.
- [25] M. Shrestha, H. Rijal, G. Kayo y M. Shukuya, «A field investigation on adaptive thermal comfort in school buildings in the temperate climatic region of Nepal,» *Building and Environment*, vol. 190, pp. 107523, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107523>, 2021.
- [26] S. Shahzad y H. B. Rijal, «Preferred vs neutral temperatures and their implications on thermal comfort and energy use: Workplaces in Japan, Norway and the UK,» *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3113-3118, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.1007>, 2019.
- [27] S. Shooshtarian, C. K. C. Lam y I. Kenawy, «Outdoor thermal comfort assessment: A review on thermal comfort research in Australia,» *Building and Environment*, vol. 177, pp. 106917, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106917>, 2020.
- [28] F. Binarti, M. D. Koerniawan, S. Triyadi, S. S. Utami y A. Matzarakis, «A review of outdoor thermal comfort indices and neutral ranges for hot-humid regions,» *Urban Climate*, vol. 31, pp. 100531, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100531>, 2020.
- [29] B. J. He, L. Ding y D. Prasad, «Outdoor thermal environment of an open space under sea breeze: A mobile experience in a coastal city of Sydney, Australia,» *Urban Climate*, vol. 31, pp. 100567, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100567>, 2020.
- [30] X. Chen, L. Gao, P. Xue, J. Du y J. Liu, «Investigation of outdoor thermal sensation

- and comfort evaluation methods in severe cold area,» *Science of the Total Environment*, vol. 749, n° 66, pp. 141520, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141520>, 2020.
- [31] L. A. Vargas Robles, M. Tovar Hurtado y G. J. Santos Victoria, «Potencial de acondicionamiento térmico en exteriores urbanos, a través del uso de especies de árboles nativos: caso de León, Guanajuato.,» de *XLIII Semana Nacional de Energía Solar 2019*. [https://www.researchgate.net/publication/342797938\\_Potencial\\_de\\_acondicionamiento\\_termico\\_en\\_exteriores\\_urbanos\\_a\\_traves\\_del\\_uso\\_de\\_especies\\_de\\_arboles\\_nativos\\_caso\\_de\\_Leon\\_Guanajuato](https://www.researchgate.net/publication/342797938_Potencial_de_acondicionamiento_termico_en_exteriores_urbanos_a_traves_del_uso_de_especies_de_arboles_nativos_caso_de_Leon_Guanajuato), Nuevo Vallarta, Nayarit, 2019.
- [32] F. Martín del Campo Saray, R. José Valladares Anguiano, G. Bojórquez Morales y C. García Gómez, «Estudio de habitabilidad térmica en periodo frío para espacios públicos exteriores,» *Revista de Ciencias Tecnológicas*, vol. 3, n° 3, pp. 145-172, <https://doi.org/10.37636/recit.v33145172>, 2020.
- [33] J. Song y Z. H. Wang, «Impacts of mesic and xeric urban vegetation on outdoor thermal comfort and microclimate in Phoenix, AZ,» *Building and Environment*, vol. 94, n° 2, pp. 558-568, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.016>, 2015.
- [34] K. Fabbri, A. Ugolini, A. Iacovella y A. P. Bianchi, «The effect of vegetation in outdoor thermal comfort in archaeological area in urban context,» *Building and Environment*, vol. 175, pp. 106816, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106816>, 2020.
- [35] A. Karimi, H. Sanaeian, H. Farhadi y S. Norouzian-Maleki, «Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park,» *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1670-1684, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.015>, 2020.
- [36] T. Martins, L. Adolphe y C. Barroso-Krause, «Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in tropical climate,» *Proceedings of Climate and Construction*, vol. 36, pp. 100775, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100775>, 2021.
- [37] M. Z. Targhi y S. Van Dessel, «Potential Contribution of Urban Developments to Outdoor Thermal Comfort Conditions: The Influence of Urban Geometry and Form in Worcester, Massachusetts, USA,» *Procedia Engineering*, vol. 118, pp. 1153-1161, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.457>, 2015.
- [38] N. Nasrollahi, Y. Namazi y M. Taleghani, «The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 65, pp. 102638, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102638>, 2021.
- [39] J. Rincón-Martínez, K. Martínez-Torres, M. González-Trevizo y F. Fernández-Melchor, «Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C.,» *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, vol. 24, n° 1, pp. 1-17, <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/186>, 2020.
- [40] E. García, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen [para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana], México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
- [41] V. Fuentes y A. Figueroa, Criterios de Adecuación Bioclimática en la Arquitectura, Instituto Mexicano del Seguro Social, México, 1990.
- [42] SMN-CONAGUA, «Datos climáticos registrados por la Estación Meteorológica Automática BC-02,» Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA), periodo 2000-2017, Ensenada, 2017.

- [43] B. Huerta, Manual de diseño pasivo para el arquitecto: un reflejo del análisis climático y bioclimático de Ensenada, Baja California, (Tesis de licenciatura no publicada) Ensenada, 2018.
- [44] International Organization for Standardization., ISO 7726:1998 (E) Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities., Ginebra: Autor, 1998.
- [45] J. Rincón, Confort térmico en bioclima semi-frío: Estimación a partir de los enfoques de estudio adaptativo y predictivo, Tesis Doctoral. Ciudad de México, 2015.
- [46] International Organization for Standardization., ISO 10551:1995 (E) Ergonomics of thermal environment – assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales., Ginebra: Autor, 2002.
- [47] M. Noguchi y B. Givoni, «Outdoor comfort as a factor in sustainable town,» *Proceedings of the Second International Conference for Teachers in Architecture*, pp. Paper 3.01, Florence, Italy, 1997.
- [48] F. Nicol, Thermal Comfort: A Handbook for Field Studies Toward an Adaptive Model, London, University of East London., 1993.
- [49] D. e. a. Cardona, «Inferencia Estadística. Módulo de Regresión Lineal Simple,» Cardona, D. et al. (2013). Inferencia Estadística. Módulo de Regresión Lineal Simple, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia [on-line]., 2013. [En línea]. Available: [http://www.urosario.edu.co/Administracion/documentos/Documentos-de-Investigacion/BI\\_147-Web.pdf](http://www.urosario.edu.co/Administracion/documentos/Documentos-de-Investigacion/BI_147-Web.pdf). [Último acceso: 15 Agosto 2020].
- [50] T. Bedford, “The Warmth Factor in Comfort at Work: a Physiological Study of Heating and Ventilation” in Report No. 76. HMSO, Industrial Health Research Board., 1936.
- [51] J. Rzedowski, Capítulo 3. Clima. En J, Rzedowski, Vegetación en México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2006.
- [52] Cedar Lake Ventures, «El clima promedio en Mexicali, México,» Weather Spark, 25 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/2211/Clima-promedio-en-Mexicali-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>. [Último acceso: 12 enero 2021].
- [53] Cedar Lake Ventures, «El clima promedio en Nogales, México,» Weather Spark, 25 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/2842/Clima-promedio-en-Nogales-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>. [Último acceso: 12 enero 2021].
- [54] International Organization for Standardization., ISO 9920:2007 (E) Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, Ginebra: Autor, 2007.
- [55] International Organization for Standardization., ISO 8996:2004 (E) Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate, Ginebra: Autor, 2004.



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](#)



# Desarrollo analítico de derivados del fenol en agua utilizando cromatografía de líquidos

## *Analytical development of phenol derivatives in water using liquid chromatography*

Alfonso Lemus-Solorio<sup>1</sup> , María Elena Núñez-Gaytán<sup>1</sup>, Ana María Núñez-Gaytán<sup>1</sup>, Martha Angélica Lemus-Solorio<sup>2</sup> , Sandra Núñez-Hernández<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 de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
Ciudad Universitaria; Avenida Francisco J. Múgica S/N Ciudad Universitaria, Edificio "E", Planta Baja. Laboratorio de Investigación a Microescala. Morelia, Michoacán, México.

**Autor de correspondencia:** Alfonso Lemus Solorio, Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. E-mail: [1209689x@umich.mx](mailto:1209689x@umich.mx). ORCID: 0000-0003-2736-5600.

**Recibido:** 16 de Abril del 2021

**Aceptado:** 10 de Mayo del 2021

**Publicado:** 28 de Mayo del 2021

**Resumen.** - Se ha desarrollado un método analítico por cromatografía de líquidos de alta eficiencia para la determinación de cloro y nitrofenoles al nivel de trazas ( $\mu\text{g/L}$ ) en agua, empleando un gradiente de elución de fase reversa y un detector ultravioleta (UV). Se empleó un método de Extracción en Fase Sólida (EFS), que implicó el diseño de un sistema bidimensional de pre-columnas acoplado con la cromatografía de líquidos de alta eficiencia (CLAE) con el fin de efectuar la preconcentración, purificación y aislamiento de los solutos en matrices acuosas ambientales. Estos compuestos fenólicos son considerados contaminantes prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA); los compuestos son: 4,6-dinitro-2-metilfenol, 2,4-dimetilfenol, 4-cloro-3-metilfenol, 2,4-diclorofenol, 2,4,6-triclorofenol y pentaclorofenol. El método desarrollado es simple, rápido, exacto y preciso. Se obtuvieron recuperaciones mayores del 90 % para los fenoles 4,6-dinitro-2-metilfenol, 2,4-diclorofenol y 2,4,6-triclorofenol, aproximadamente 80 % para el pentaclorofenol y 52 % para el 2,4-dimetilfenol. Además, se obtuvo una precisión ( $CV < 5\%$ ) aceptable para todos los solutos a estos niveles de concentración.

**Palabras clave:** Compuestos fenólicos; Gradiente de elución; Sistema de pre-columnas; Cromatografía de líquidos de alta eficiencia.

**Abstract.** - A high-performance liquid chromatographic analytical method has been developed for the determination of chlorine and nitrophenols at trace level ( $\mu\text{g/L}$ ) in water, using a reversed-phase elution gradient and an ultraviolet (UV) detector. A Solid Phase Extraction (SPE) method was employed, which involved the design of a two-dimensional pre-column system coupled with high-performance liquid chromatography (HPLC) in order to preconcentrate, purify and isolate the solutes in environmental aqueous matrices. These phenolic compounds are considered priority pollutants by the United States Environmental Protection Agency (USEPA); the compounds are: 4,6-dinitro-2-methylphenol, 2,4-dimethylphenol, 4-chloro-3-methylphenol, 2,4-dichlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol and pentachlorophenol. The developed method is simple, fast, accurate and precise. Recoveries greater than 90 % were obtained for the phenols 4,6-dinitro-2-methylphenol, 2,4-dichlorophenol and 2,4,6-trichlorophenol, approximately 80 % for pentachlorophenol and 52 % for 2,4-dimethylphenol. In addition, an acceptable precision ( $CV < 5\%$ ) was obtained for all solutes at these concentration levels.

**Keywords:** Phenolic compounds; Elution gradient; Pre-column system; High performance liquid chromatography.



## 1. Introducción

Los derivados fenólicos cloro, nitro y alquilo son ampliamente utilizados en diversos procesos químicos como intermediarios en la fabricación de plásticos, colorantes, pesticidas y medicamentos. Así, la presencia de estos compuestos en numerosos efluentes industriales ha dado origen a la contaminación de aguas superficiales y potables. Por su alta toxicidad para los organismos vivos y para el hombre, varios compuestos fenólicos han sido clasificados como contaminantes prioritarios y deben ser monitoreados continuamente, en ocasiones a muy bajos niveles de concentración, en matrices acuosas (USEPA, 1980). Este problema ha derivado en la necesidad de realizar un estricto control de los productos potencialmente peligrosos en el agua al desarrollar métodos sensibles y eficientes que permitan monitorear contaminantes traza en agua.

Como antecedente importante de este trabajo se encuentran los estudios realizados por Soper y Smith, quienes ya desde 1926 habían publicado constantes de velocidad de cloración de diferentes compuestos, incluyendo el fenol y algunos clorofenoles [1]. En las últimas décadas (2006-2008) et al. [2-3], realizaron experimentos de cloración del fenol en el intervalo de pH 6-9 y presentaron los perfiles de concentración en función del tiempo del compuesto progenitor y los 5 clorofenoles formados a partir de éste. Los compuestos de interés fueron seguidos durante un periodo de 5 horas, utilizando cromatografía de líquidos con detección UV para su separación y cuantificación. Sin embargo, las altas concentraciones de fenol (~100 µM) y cloro (~400 µM) utilizadas en este estudio, restan interés a los resultados obtenidos.

Las técnicas analíticas más utilizadas en la determinación cuantitativa de fenoles son los métodos cromatográficos. La cromatografía de gases es una técnica analítica poderosa de alta resolución en la determinación de clorofenoles y

los detectores empleados como el de ionización de flama, el de captura de electrones y la espectrometría de masas son altamente sensibles. Sin embargo, debido a la alta polaridad del fenol y algunos clorofenoles, estos tienden a dar picos anchos y coleados. Este inconveniente se evita realizando una etapa de derivatización para transformarlos en analitos menos polares mejorando así sus propiedades cromatográficas. Por su parte, la cromatografía de líquidos de alta eficiencia (CLAE), es una técnica analítica eficiente, sensible, precisa, exacta y de gran capacidad en la separación de isómeros de posición, permite ajustar la selectividad de la separación mediante cambios en la composición de la fase móvil (pH, naturaleza y contenido de disolventes orgánicos).

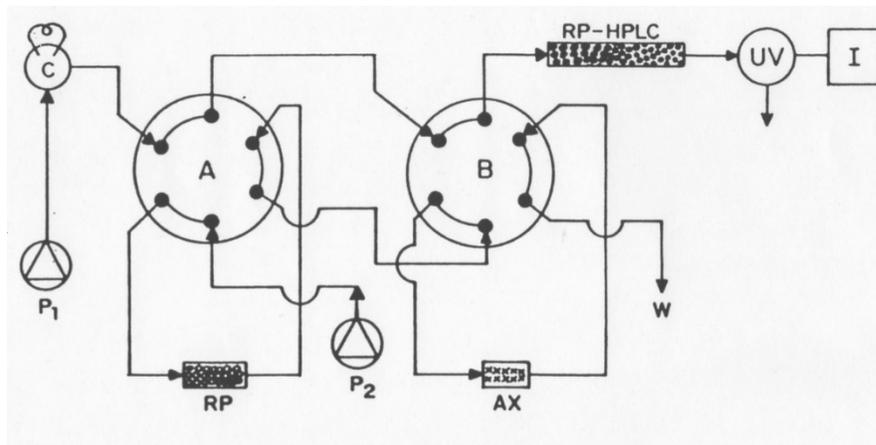
## 2. Metodología

Para aplicar el método en muestras de aguas naturales se requiere realizar un paso previo de filtración empleando vacío y una membrana de nylon de 0.45 µm de porosidad, previamente sumergida en metanol para minimizar los riesgos de contaminación de la muestra.

### 2.1 Extracción y concentración de los analitos

Este es el pretratamiento de la muestra que se realiza mediante la Extracción en Fase Sólida. Este paso se efectúa en una pre-columna de acero inoxidable (30 x 4.6 mm D.I.) empacada con un adsorbente polimérico del tipo estireno-divinilbenceno de 10 µm de tamaño de partícula (pre-columna RP en la figura 1). Este adsorbente es de gran capacidad, pero baja selectividad.

La muestra es acidificada a pH 2 para que los solutos queden retenidos en su forma molecular por el adsorbente no polar. Una bomba isocrática (P2) permite pasar la muestra a través de la pre-columna, ésta última se encuentra montada en una válvula de conmutación (válvula A) como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Sistema experimental en línea para efectuar la preconcentración, limpieza y análisis de fenoles. P<sub>1</sub>: sistema HPLC para gradiente binario, P<sub>2</sub>: bomba isocrática, A y B: válvulas de conmutación, C: inyector, W: deshechos, UV: detector ultravioleta, RP: pre-columna polimérica de extracción, AX: pre-columna aniónica de purificación, RP-HPLC: columna analítica C-18.

El volumen de muestra que se carga en la pre-columna es de 50 mL, con el cuál ninguno de los analitos se fuga de la pre-columna.

## 2.2 Limpieza del extracto

Debido a la baja selectividad del adsorbente polimérico, es necesario efectuar un paso de limpieza del extracto, para ello se aprovechan las propiedades ácido-base de los fenoles y la característica de los adsorbentes poliméricos de retener muy poco a los compuestos ionizados. Los valores de los pK<sub>a</sub> en agua de los seis fenoles: 4,6-dinitro-2-metilfenol (pK<sub>a</sub> 4.35), 2,4-dimetilfenol (pK<sub>a</sub> 10.58), 4-cloro-3-metilfenol (pK<sub>a</sub> 9.55), 2,4-diclorofenol (pK<sub>a</sub> 7.85), 2,4,6-triclorofenol (pK<sub>a</sub> 6.42) y pentaclorofenol (pK<sub>a</sub> 5.26).

La limpieza del extracto se efectúa transfiriendo los fenoles con una mezcla metanol-sosa, desde la pre-columna de fase reversa hacia una segunda pre-columna (20 x 2 mm D.I.), empacada con un

intercambiador de aniones de 10 µm y colocada en una segunda válvula de conmutación (pre-columna AX en válvula B de la figura 1). Las condiciones óptimas para la transferencia son con 25 mL de una mezcla metanol-sosa (pH 11) 40:60 v/v.

## 2.3 Separación y análisis de la mezcla de fenoles

La separación y determinación cromatográfica de los analitos se realiza acoplando en línea la pre-columna aniónica con la columna analítica (RP-HPLC) (150 x 4.6 mm D.I.) empacada con una fase reversa C-18, (Spherisorb Ods-2) de 5 µm de tamaño de partícula. Se utilizó un gradiente de disolventes acetonitrilo-agua (pH 4.5), con un buffer de acetatos. El flujo usado fue de 1 mL/min. La detección de los analitos se realizó con un detector UV. Se fijó la longitud de onda de detección a 270 nm que es un valor típico para la detección de fenoles (Puig, Barceló, 1996).

## 3. Resultados y Discusiones

El análisis de la muestra concentrada y purificada se realiza acoplando en línea la pre-columna aniónica con una columna analítica de alta

eficiencia. Para lograr una buena separación de la mezcla de los seis fenoles era necesario determinar la composición adecuada de la fase móvil tal que

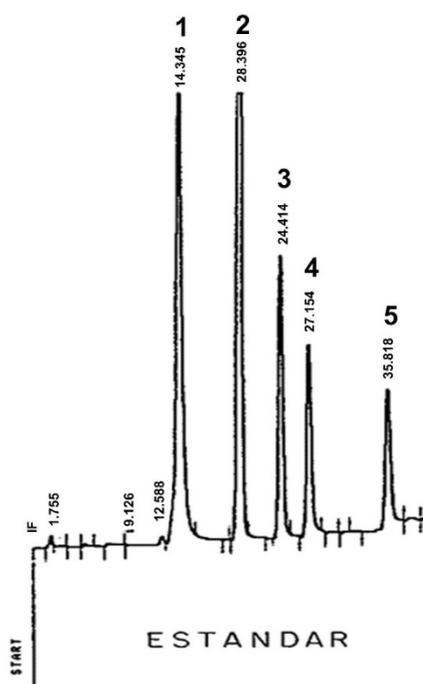


permitiera efectuar la elución de los solutos, es decir la transferencia en línea de los analitos de la pre-columna aniónica hacia la columna analítica y su posterior separación cromatográfica. Al efectuar diversos ensayos se observó que con la corrida isocrática no se logra obtener una resolución aceptable de la mezcla de fenoles hidrofóbicos. Los primeros solutos (nitrofenoles y monoclorofenoles) eluyen rápidamente mientras que los fenoles multiclorados tienen tiempos de retención muy largos y dan lugar a picos excesivamente anchos y difíciles de integrar.

Además, como este método se desarrolló para aplicarlo en muestras de agua residuales y superficiales, se pretendió que los tiempos de retención de los primeros solutos eluidos fueran

relativamente grandes con el objeto de que todas las interferencias presentes en la matriz, no eliminadas durante los procesos de preconcentración y limpieza, y que generalmente eluyen a tiempos de retención muy cortos, pudieran interferir en el análisis y detección de los solutos de interés [6].

En efecto, cuando se trabaja con muestras de aguas naturales, es común observar al principio del cromatograma la elución de un gran pico de matriz que desciende muy lentamente y dificulta o hace imposible la cuantificación precisa de los analitos poco retenidos. Por esta razón, se ensayó la elución en gradiente, siendo la separación cromatográfica más adecuada la mostrada en la figura 2.



**Figura 2.** Separación de la mezcla de fenoles con gradiente de elución usando como fase móvil: Fase A: acetonitrilo-agua (pH 4.5) (15:85) v/v, y la fase B: acetonitrilo-agua (pH 4.5) (70:30). Buffer de ácido acético- acetato de sodio. El tiempo de separación es de aproximadamente 40 minutos. Flujo 1 mL/min, detector UV. Sensibilidad 0.05 AUFS. El orden de elución de los analitos es: 1) 4,6-dinitro-2-metilfenol, 2) 2,4-dimetilfenol, 3) 4-cloro-3-metilfenol, 4) 2,4-diclorofenol, 5) 2,4,6-triclorofenol y 6) pentaclorofenol.

El gradiente usado es el siguiente (tabla 1):

**Tabla 1.** Gradiente de concentración utilizado.

Tiempo (min)	0	35	50
% B	8	60	60

La evaluación estadística de este método desarrollado para la determinación de trazas de cloro y nitrofenoles en agua mediante el empleo de un sistema bidimensional de pre-columnas acopladas en línea con la cromatografía de



líquidos permitió determinar su precisión y exactitud, los cuáles se determinaron al analizar 8

réplicas de agua dopada con los fenoles a una concentración de 13.3 µg/L (Tabla 2).

**Tabla 2.** Precisión y exactitud del método

Compuesto	% de recobro	% Coeficiente de variación (CV)
4,6-dinitro-2-metilfenol	95.2	1.8
2,4-dimetilfenol	52.6	2.5
4-cloro-3-metilfenol	94.4	2.0
2,4-diclorofenol	94.6	1.1
2,4,6-triclorofenol	100.3	2.6
pentaclorofenol	82.2	2.8

*Intervalo lineal del método.* Este parámetro debe estudiarse adecuadamente cuando se analizan trazas de analitos. Representa el intervalo lineal de concentraciones en el cual se cumple la proporcionalidad entre la concentración de analito y su respuesta. Dentro de este intervalo lineal se puede determinar el compuesto de interés por interpolación [7]. El estudio de la linealidad de este método desarrollado se analizaron muestras de agua grado cromatográfico dopadas con cada uno de los seis fenoles empleando un intervalo de concentraciones de 1.33 a 100 µg/L. El método es lineal en el intervalo de concentraciones de ~ 1.3 a ~ 90 µg/L.

Se desarrolló un método simple y eficiente para la determinación de cloro, nitro y metilfenoles en agua. En esta metodología la manipulación de la muestra es mínima por lo que se favorece la precisión de las determinaciones y se reducen los riesgos para el analista. Una ventaja adicional es que el método puede ser casi completamente automatizado utilizando válvulas de conmutación activadas mediante señales eléctricas, por lo cual resulta idóneo para emplearse en análisis de rutina [8].

#### 4. Conclusiones

La determinación cuantitativa de trazas de cloro y nitrofenoles en agua a niveles de trazas (µg/L) se puede realizar de manera simple, rápida y eficiente empleando un método en línea de EFS acoplada a la cromatografía de líquidos. Esta metodología desarrollada permite minimizar los riesgos de pérdida y contaminación de la muestra. El método es lineal en el intervalo de concentraciones de ~ 1.3 a ~ 90 µg/L. La precisión de recuperación es aceptable (CV < 5 %) y la exactitud obtenida para cinco de los fenoles se considera buena para estos niveles de concentración.

#### 5. Reconocimiento de autoría

**Alfonso Lemus-Solorio:** Investigación; Escritura borrador original; Metodología. **María Elena Núñez-Gaytán:** Investigación; Metodología; Supervisión; Adquisición de fondos. **Ana María Núñez-Gaytán:** Conceptualización; Metodología; Recursos. **Martha Angélica Lemus-Solorio:** Análisis formal; Curación de datos; Metodología; Escritura borrador original. **Sandra Núñez-Hernández:** Conceptualización; Validación; Análisis formal.



## Referencias

- [1] F. G. Soper and G. F. Smith, "CCVI. —The halogenation of phenols," *J. Chem. Soc.*, vol. 129, no. 0, pp. 1582–1591, 1926, <https://doi.org/10.1039/JR9262901582>.
- [2] F. Ge, L. Zhu, and H. Chen, "Effects of pH on the chlorination process of phenols in drinking water," *J. Hazard. Mater.*, vol. 133, no. 1, pp. 99–105, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.09.062>.
- [3] F. Ge, L. Zhu, and J. Wang, "Distribution of chlorination products of phenols under various pHs in water disinfection," *Desalination*, vol. 225, no. 1, pp. 156–166, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.016>.
- [4] USEPA. Ambient Water Quality Criteria for Chlorinated Phenols, United States. Environmental Protection Agency, EPA 440/5-80-032. A1-C124, Washington D.C. (1980).
- [5] D. Puig and D. Barceló, "Comparison of different sorbent materials for on-line liquid-solid extraction followed by liquid chromatographic determination of priority phenolic compounds in environmental waters," *J. Chromatogr. A*, vol. 733, no. 1, pp. 371–381, 1996, [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(95\)01136-6](https://doi.org/10.1016/0021-9673(95)01136-6).
- [6] A. M. Núñez-Gaytán, L. E. Vera-Avila, M. G. De Llasera, and R. Covarrubias-Herrera, "Speciation and transformation pathways of chlorophenols formed from chlorination of phenol at trace level concentration," *J. Environ. Sci. Heal. Part A*, vol. 45, no. 10, pp. 1217–1226, Jul. 2010, <https://doi.org/10.1080/10934529.2010.493785>
- [7] A. M. Nuñez-Gaytán, L. E. Vera-Ávila, and M. del R. Covarrubias-Herrera, "On-line methodology for the trace level determination of the chlorinated phenol family in water samples," *J. Mex. Chem. Soc.*, vol. 52, pp. 185–192, 2008, [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-249X2008000300003&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2008000300003&nrm=iso).
- [8] I. Canals, E. Bosch, and M. Rosés, "Prediction of the separation of phenols by capillary zone electrophoresis," *Anal. Chim. Acta*, vol. 458, no. 2, pp. 355–366, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)00079-X).



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 los aspectos fenomenológicos y semiológicos en la arquitectura algorítmica-paramétrica

## *Analysis of the phenomenological and semiological aspects in Parametric-Algorithmic Architecture*

Aarón Tadeo Onchi Rascón , Alejandro José Peimbert Duarte , Jesús Antonio Ley Guing 

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

**Autor de correspondencia:** Aarón Tadeo Onchi Rascón, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México. E-mail: [onchia@uabc.edu.mx](mailto:onchia@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0003-2167-6758.

**Recibido:** 25 de Febrero del 2021

**Aceptado:** 21 de Abril del 2021

**Publicado:** 26 de Abril del 2021

**Resumen.** - *El presente artículo hace un análisis de los aspectos fenomenológicos y semiológicos inherentes en la Arquitectura computacional. Primeramente, desarrolla un estudio descriptivo y comparativo de los aspectos fenomenológicos y semiológicos en la metodología de diseño arquitectónico, a través de las teorías de los principales arquitectos referentes en el tema. Analiza la implementación de estos aspectos en la Arquitectura Algorítmica-Paramétrica (AAP). Finalmente, propone un diagrama metodológico con su implementación. El estudio realizado distingue cualidades de mayor compatibilidad que fricción en los aspectos analizados. Ejemplifica a través de los productos arquitectónicos de Kengo Kuma y las manifestaciones vanguardistas de diseño computacional llamado Discretismo, la afinidad latente entre estos enfoques. La metodología propuesta, muestra herramientas algorítmicas para generar producciones similares a través del entorno de programación visual llamado Grasshopper.*

**Palabras clave:** *Arquitectura computacional; Fenomenología; Semiología; Proceso de diseño; Arquitectura Algorítmica-Paramétrica.*

**Abstract.** – *This article makes an analysis of the phenomenological and semiological aspects inherent in computational architecture. It develops a descriptive and comparative study of the phenomenological and semiological aspects in the architectural design methodology, through the theories of the main referent architects on this topic. Analyze the implementation of these aspects in the Parametric-Algorithmic Architecture (PAA). Finally, it proposes a methodological diagram with its implementation. This study distinguishes qualities of greater compatibility than friction in the aspects analyzed. It exemplifies through the architectural products of Kengo Kuma and the avant-garde manifestations of computational design called Discretism, a latent affinity between these approaches. The proposed methodology shows algorithmic tools to generate similar productions through the visual programming environment called Grasshopper.*

**Keywords:** *Computational Architecture; Phenomenology; Semiology; Design Process; Parametric-Algorithmic Architecture.*



## 1. Introducción

La Arquitectura (occidental) a lo largo de su historia, ha mantenido una constante discusión entre los aspectos cualitativos y cuantitativos que la conforman. Esa tensión esencialmente ha sido producto del enfoque en el que se apoya la sociedad para dar sentido a todas las cosas que se encuentran alrededor, y a la perspectiva desde la cual se concibe y construye todo producto hecho por el hombre. Este escenario, tiene un carácter dialéctico y retórico epistemológico, que recae naturalmente en las concepciones filosóficas de las distintas épocas del desarrollo humano.

El punto de partida a esta discusión tiene origen en la conciencia y posturas alrededor del tema de la relación del hombre con las cosas; las cuales promovieron el establecimiento de las principales familias de la teoría filosófica clásica: el idealismo y el materialismo.

Mientras Platón situaba a los objetos como producto de la razón: “los objetos del conocimiento se reducen a esencias universales que son exclusivamente producto de la mente” citado por [1, p. 34], Aristóteles los comprendía como sustancias compuestas de materia y forma que hacen la realidad: “yo, por otra parte, valoro el sentido del tacto” citado por [1, p. 34].

En este sentido, y con una aproximación mayor al espacio y la belleza como unos de los principales valores de análisis de la Arquitectura, Platón concibió al primero a través de la geometría, la cual consideraba como su ciencia (idealismo), mientras que Aristóteles posteriormente desarrolló la teoría del “lugar” (topos) y definió al espacio como la suma de todos los lugares,

con propiedades cualitativas y dinámicas de dirección (materialismo) [2].

En relación a la belleza, el debate en la antigua Grecia no fue diferente, según Bloomer y Moore [1], “comenzó a debatirse el tema de la procedencia de las leyes que gobiernan nuestro sentido de belleza. Este debate llevaba necesariamente a intentar descubrir cuáles eran las funciones del cuerpo humano y de su aparato sensorial” [1, p. 35].

La tensión entre estas dos posiciones filosóficas ha sido reiterativa, sin embargo, a partir de la ilustración, se manifiesta enfocada en los conceptos de la razón contra los sentidos. Las motivaciones racionalistas de esa época impulsaron el escepticismo en la fiabilidad de los sentidos y a desconfiar de todo aquello que no fuera producto del pensamiento.

A partir de la fundación de las academias científicas, los debates entre los conceptos de “belleza” y la “función” emergen en la época Neoclásica y adquieren mayor intensidad en el Modernismo, así que se convierten en un referente de discusión de la vida arquitectónica postmoderna, y se mantienen aún latentes (o heredados) en la contemporaneidad.

No obstante, es posible encontrar en la arquitectura de Frank Lloyd Wright, Alvar Aalto o Louis Kahn, proyectos modernos que manifiestan un equilibrio latente y sinérgico entre estos dos valores aparentemente contrarios.

A partir de las últimas décadas del siglo XX, como remanente de la tensión entre los sentidos y la razón, esta dicotomía ha adquirido en la creación arquitectónica, el carácter cualitativo de valorar los aspectos



fenomenológicos o semiológicos del espacio.

Es decir, la discusión se enfoca en dar mayor peso a los estímulos sensoriales generados por la experiencia del espacio arquitectónico ya creado (Materialismo), o en considerar más importante los estímulos de la mente y las relaciones del significado, que tienen su génesis en las ideas, en el concepto arquitectónico o en el diagrama, de una Arquitectura que aún no es realizada, que tiene una condición proyectada, virtual o inclusive digital-computacional (Idealismo).

El presente artículo analizará estos aspectos, a partir de referentes importantes en el tema como, Norberg-Schulz [2], [3], Bloomer y Moore [1], Peter Zumthor [4], [5], Josep María Montaner [6] y Peter Eisenman [7].

Paralelamente, los debates actuales en relación a la metodología de diseño arquitectónico, también evalúan en un marco más cuantitativo, si los productos que aprovechan la vanguardia de la tecnología computacional y robótica, deban surgir a partir de lógicas causales derivadas de la síntesis matemática y racional dominante en el movimiento moderno y la primer era digital de la Arquitectura, donde era necesario resolver problemas con poca información, o a través de métodos más intuitivos de búsqueda heurística de la inteligencia artificial y el *Big Data*, como auxiliares en la producción arquitectónica [8], [9].

Ante esta realidad contemporánea de analizar los valores dicotómicos anteriores, también es posible identificar en la actualidad expresiones arquitectónicas importantes con un carácter equilibrado o híbrido, donde las concepciones racionales o intuitivas relacionadas con la interacción

del hombre y los objetos, van de la mano en un comportamiento sinérgico y recursivo.

Es el caso de la obra de arquitectos contemporáneos como Herzog & DeMeuron, Sou Fujimoto, Toyo Ito, y en especial Kengo Kuma [10] que el presente trabajo analizará algunas de sus manifestaciones arquitectónicas como caso de estudio.

## 2. Análisis descriptivo de los aspectos fenomenológicos en la Arquitectura

El aspecto fenomenológico tiene un carácter filosófico y epistemológico fundamentalmente materialista, aunque mantiene una esencia humanista heredada desde las manifestaciones platónicas renacentistas y neoclásicas, se basa en el existencialismo y realismo específico.

Este enfoque se centra en la experiencia espacial y la repercusión que esta tiene en los sentidos, con una atención especial en el sentido háptico y la envolvente corporal como el parámetro de referencia para el análisis de las coordenadas psicofísicas, que funcionan como directrices en el entendimiento del espacio.

Es posible encontrar afinidades de referencia cruzada, compleja o Deleuziana con el modernismo y el postmodernismo; ya que, al tener un fundamento materialista, se enfoca en la realidad material y la comprobación de la experiencia espacial más que en la estructuración de conceptos; sin embargo, es guiada por aspectos cualitativos de la intuición y las apreciaciones sensoriales, que se aproximan a las motivaciones postmodernas.

También, a partir de este hecho, mantiene un carácter racional con una referencia humanista cercana al enfoque moderno. Según Montaner [6], las bases, teorías y principales exponentes arquitectónicos son:



La tradición del realismo ha evolucionado hacia el realismo específico de la fenomenología de los filósofos Edmund Husserl, Merleau-Ponty, Edith Stein y Gaston Bachelard y del existencialismo de Martin Heidegger y Hannah Arendt. Ello se ha conceptualizado en las teorías de Juhani Pallasmaa y Alberto Pérez-Gómez, y se ha expresado en las obras de Steven Holl, Glenn Murcutt, Peter Zumthor, Elizabeth Diller y Ricardo Scofidio, Tod Williams y Billie Tsien, entre otros. [6, p. 52]

Es importante agregar a los anteriores referentes, las aportaciones teóricas de Norberg-Schulz [2], [3], así como las de Bloomer y Moore [1], como una referencia relevante en la consolidación teórica de los aspectos fenomenológicos en la arquitectura. Ellos también posicionan a los arquitectos Alvar Aalto y Luis Barragán, como manifestantes pioneros de una Arquitectura que pone atención a los detalles que promuevan el estímulo sensorial.

Una descripción a fondo de las construcciones teóricas de estos últimos exponentes, pudiera ser estudiada a partir de considerar el análisis de los aspectos topológicos del espacio cognoscitivo y artístico de Norberg-Schulz [2], [3] y los aspectos de estímulos en los sistemas sensoriales de la experiencia espacial de Bloomer y Moore [1].

### ***2.1 Aspectos topológicos del espacio cognoscitivo y artístico de Norberg-Schulz***

Para el entendimiento de los aspectos topológicos, primero debe tenerse como referencia la definición de los distintos espacios que entran en juego en la percepción humana, los cuales son según Norberg-Schulz [2]: (a) el espacio pragmático, de la acción física, una función del instinto innato que es expresada y

comunicada a través de relaciones espaciales como arriba y abajo, delante y detrás, derecha e izquierda; (b) el espacio cognoscitivo, del mundo físico; (c) el espacio artístico, o creado para expresar la estructura del mundo imaginario; (d) y el espacio abstracto, perteneciente a las relaciones lógicas.

El espacio cognoscitivo descrito anteriormente, se encuentra conformado por (a) el espacio perceptivo y (b) el espacio existencial; el primero se refiere a la orientación inmediata y el segundo forma la imagen estable del ambiente que rodea al hombre, también de este último derivan dos aspectos que permiten describirlo a detalle: (a) el aspecto abstracto, que consta de esquemas de índole **topológica** y **geométrica**, y (b) el aspecto concreto que se refiere a la captación de “elementos circundantes” como: el paisaje rural, ambiente urbano, edificios y elementos físicos.

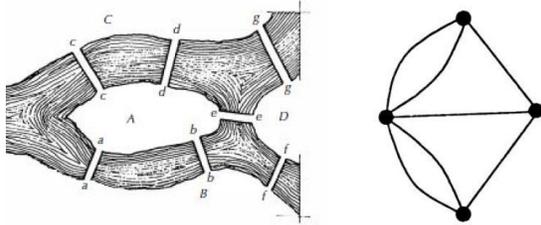
El espacio artístico, paralelamente se encuentra conformado por (a) el espacio expresivo, el cual se encuentra en manos de personas especializadas como constructores, arquitectos y planificadores; y (b) el espacio estético, estudiado por teóricos de la Arquitectura y filósofos. Ambos forjan una construcción abstracta para su descripción, y juntos consolidan el **espacio arquitectónico**.

Según lo anterior, como parte del espacio existencial, el análisis de la topología es fundamental en la comprensión de los esquemas de organización y orientación espacial, antes de determinar las condiciones geométricas que determinarán una morfología con carácter más específico (Figura 1). Según Tedeschi [11]:

**La topología** es el estudio de la relación entre las partes geométricas sometidas a



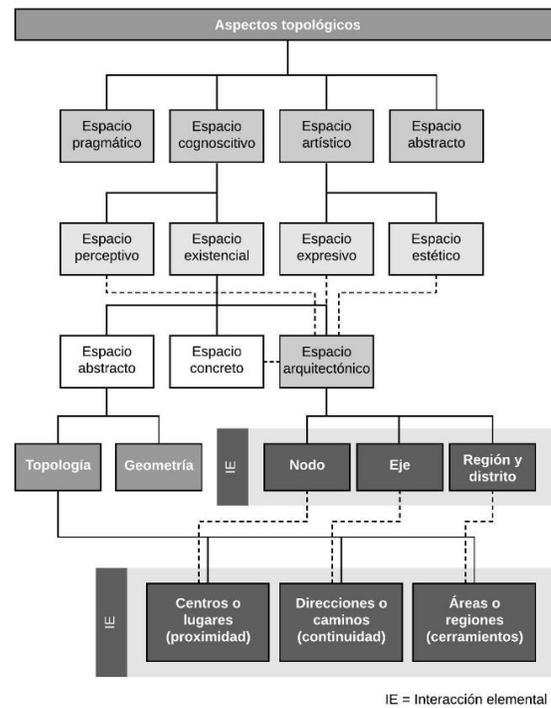
deformación. A diferencia de la geometría plana, el análisis topológico no requiere mediciones métricas o angulares; en cambio, el estudio de la topología se basa en la comparación de figuras [11, p. 411].



**Figura 1.** Diagrama de los siete puentes de Könisberg (izquierda) y Grafo de Euler como demostración topológica a los siete puentes de Könisberg (derecha) [12, p. 66].

Es posible describir para el estudio topológico (Figura 2) los esquemas elementales de organización como: (a) centros o lugares (proximidad), (b) direcciones o caminos (continuidad) y (c) áreas o regiones (cerramientos o cercados). “La topología no trata de distancias, ángulos y áreas permanentes, sino que está basada en relaciones tales como proximidad, separación, sucesión, clausura (interior-exterior) y continuidad”. [2, p. 20].

De la misma forma los elementos del espacio arquitectónico son: (a) lugar o nodo, se relaciona con los centros o lugares del espacio existencial, y se define como focos estratégicos en los que existen uniones de caminos o puntos de referencia externos al observador, y su función es indicar límites o direcciones; (b) camino y eje, con afinidad a las direcciones o caminos, se define como los canales a través de los cuales se mueve el observador, el eje organizador representa una dirección simbólica que unifica cierto número de elementos entre sí; (c) región y distrito, relacionado con las áreas o regiones, son las áreas que el observador puede penetrar mentalmente y son reconocibles por tener algún carácter de identificación común.



**Figura 2.** Aspectos topológicos del espacio cognoscitivo y artístico de Norberg-Schulz [2]. Elaboración propia (2020).

## 2.2 Estímulos en los sistemas sensoriales de la experiencia espacial de Bloomer y Moore

Para el análisis de los estímulos sensoriales de la experiencia espacial (Figura 3), en primera instancia, es importante definir la empatía como la transmisión de emociones o sentimientos acontecida a partir de la experiencia de los objetos. La empatía tiene un carácter meramente sensorial y no racional, se relaciona con el cuerpo y todos sus sentidos, y no específicamente con la vista (o con la mente).

El filósofo Robert Vischer [...] se refiere a ella como sentimiento más que como proceso mental [...] Al observar que también la experiencia de los objetos absolutamente abstractos podía despertar sentimientos [...] avanzó la hipótesis de que la empatía con los objetos tiene lugar



cuando se proyecta sobre ellos emociones personales. [1, p. 39].

A partir de la noción de la cualidad empática, la problemática de una desconexión entre el diseñador y su diseño adquiere mayor sentido. El debate relacionado con el desapego del diseñador con la percepción del espacio toma lugar en la ilustración, ya que es en ese momento cuando el sentido de la vista adquiere mayor relevancia sobre el resto de los sentidos y abre camino a la posibilidad de promover, por tanto, una falta de empatía sistemática con el espacio arquitectónico.

Como consecuencia del mecanismo fenomenológico de la empatía, es posible distinguir tres tipos de magnitudes al momento de percibir el espacio de una edificación, según Scott [13]:

En cualquier edificio pueden distinguirse tres cosas: la magnitud que realmente tiene (medida mecánica), la magnitud que parece tener (medida visual), y la sensación de magnitud que produce (medida corporal). Las dos últimas han sido muchas veces confundidas, pero la única que posee valor estético es la sensación de magnitud. citado por [1, p. 40]

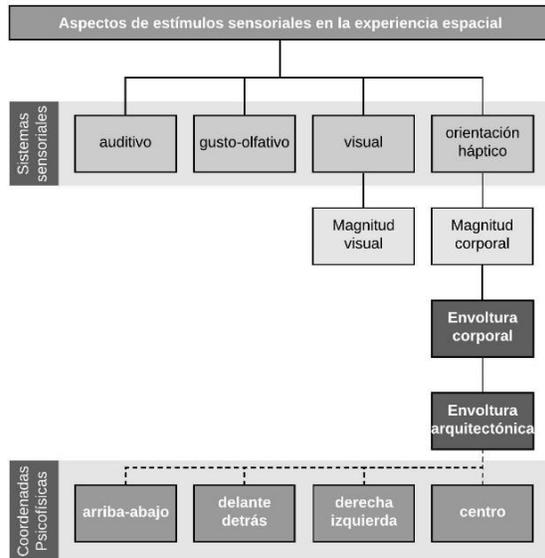
Así, es a través del conjunto de sistemas sensoriales (sistema visual, sistema auditivo, sistema gusto-olfativo, sistema de orientación y sistema háptico) propuestos por J. J. Gibson citado por [1], que la empatía es transmitida hacia las condiciones del espacio arquitectónico.

Es decir, la falta de empatía en el diseño de un espacio se produce por únicamente valorar el sistema visual, en lugar de considerar más importante el sistema de orientación y el háptico, que hacen trabajar al resto sinérgicamente.

El trabajo sinérgico de los sistemas sensoriales como principio organizativo, es determinado perceptualmente por la envoltura corporal, que marca una frontera entre el espacio personal, y el extra personal. “Se trata de una especie de barrera inestable sometida a la acción de los acontecimientos que producen tanto en su interior como en el exterior de la misma” [1, p. 55].

La percepción de los estímulos de la envoltura corporal es guiada por las **coordenadas psicofísicas** como **parámetros fenomenológicos**: arriba-abajo, delante-detrás, a la derecha-a la izquierda, así como a lo que se encuentra en el centro (el cuerpo). La noción de estas coordenadas puede adquirir una concepción ontológica:

Las coordenadas delante/detrás y derecha/izquierda son las que llevan más directamente a la definición de las cuatro coordenadas polares, Norte, Sur, Este y Oeste, mientras que los tres niveles verticales hacen referencia a las trilogías místicas, que en la cultura occidental están constituidas por el paraíso, la tierra y el infierno. [1, p. 52,53].



**Figura 3.** Estímulos en los sistemas sensoriales de la experiencia espacial de Bloomer y Moore [1]. Elaboración propia (2020).

### 2.3 La importancia de las cosas concretas y las atmósferas de Zumthor

Las apreciaciones fenomenológicas, recientemente se han visto alimentadas (y reforzadas) por la manera de entender la arquitectura de Peter Zumthor [4], [5]. Sus contribuciones teóricas se posicionan como parte de los argumentos de la contemporaneidad y tienen, por tanto, una connotación diferente a las de Norberg-Schulz [2], [3] y Bloomer y Moore [1], que son afines a las motivaciones de dinamismo, movimiento y complejidad arquitectónica del postmodernismo.

Con un posicionamiento más cercano a las ideas reduccionistas del movimiento moderno, Zumthor aboga por las cosas concretas y su naturaleza *per se*, con una aproximación a las características de la tendencia artística y arquitectónica minimalista. Aboga por una relación directa y materialista entre el hombre y el objeto, sin ninguna estructuración conceptual de por medio, más que la acontecida por la experiencia espacial y los estímulos

sensoriales afectados por la creación de una atmósfera espacial.

La realidad de la arquitectura es lo concreto, lo convertido en forma, masa y espacio, su cuerpo. No hay ninguna idea fuera de las cosas [...] La arquitectura es siempre una materia concreta; no es abstracta, sino concreta [...] Con mi trabajo contribuyo a que aparezcan circunstancias reales y creo determinadas atmósferas en el espacio que hacen que se despierten nuestros sentimientos. [5, p. 37,66,85].

Así, considera el proceso de diseño arquitectónico como una tensión entre el sentimiento y la razón, y le da al acto de proyectar el significado de inventar (o descubrir). Su metodología gira en torno a la suposición de imágenes que son producto de la ausencia, la melancolía y el recuerdo. Por otro lado, comprende a la belleza como una sensación, en el que la razón desempeña un papel subordinado (Figura 4).

El proceso de proyecto se basa en un continuo juego conjunto de sentimiento y razón. Por un lado, los sentimientos, las preferencias, las nostalgias y los deseos que emergen y que quieren cobrar forma deben examinarse por medio de una razón crítica. Del otro, el sentimiento dice si las reflexiones abstractas concuerdan entre sí. [5, p. 21].



**Figura 4.** Pabellón *Swiss Sound*. Hanover, 2000. Zumthor, P. [14] (tomado de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-swiss-sound/>).

### 3. Análisis descriptivo de los aspectos semiológicos en la Arquitectura

Contrario al enfoque fenomenológico, los aspectos semiológicos en la Arquitectura tienen un carácter filosófico y epistemológico idealista (platónico), basados en la razón, en el desarrollo de las ideas y la construcción de conceptos a través del manejo de los diagramas como principal herramienta.

Colin Rowe primero me enseñó a ver aquello que no estaba presente en un edificio [...] quería que viera las ideas implícitas en aquello que estaba físicamente presente. En otras palabras, que me preocupara menos por lo que el ojo ve -lo óptico- y más por lo que ve la mente -lo visual-. [7, p. 16]

Sin embargo, paradójicamente parten de referencias romanticistas, organicistas y

surrealistas, que posteriormente se posicionan en referencias provenientes del empirismo radical del pragmatismo estadounidense y del expresionismo arquitectónico del siglo XX. Se valen de los símbolos y de los iconos para desarrollar un lenguaje de diagramas y metáforas complejas, con una clara influencia de los desarrollos epistemológicos de Deleuze y Guattari [15], [16].

Se trata de una Arquitectura en la que, como en los sueños, se superponen tiempos, materias y capas; unas obras que se relacionan con el entorno revelando estratos y elevando voladizos, y en el que cada detalle, a la manera del Romanticismo y el surrealismo, se individualiza, se independiza, toma vida y se repiensa de una manera nueva. [6, p. 27].

Es posible encontrar entre sus principales exponentes, a arquitectos como Frank O. Gehry, Thom Mayne (Morphosis), los experimentos futuristas de NOX, FOA con una notable herencia de Archigram y Future Systems; la arquitectura fragmentada de Peter Eisenman [7], Bernard Tschumi y Rem Koolhaas, que a la vez fueron influencia importante de los estudios de Arquitectura: Zaha Hadid Architects, MVRDV, UNStudio (Ben van Berkel), BIG (Bjarke Ingels).

La propuesta de arquitecturas hechas como *collage* de fragmentos, teorizada por Colin Rowe y Peter Eisenman a partir de la década de 1970, ha seguido desarrollándose hasta la actualidad. Tiene su máximo exponente en la prolífica obra de OMA, estudio liderado por Rem Koolhaas, y se expresa en gran parte de la Arquitectura holandesa actual. [6, p. 66].

Esta arquitectura de diagramas, conceptos y símbolos han sido una influencia importante para la eclosión de la arquitectura



computacional y su avance hacia las teorías y metodologías de la arquitectura paramétrica y algorítmica.

#### **4. Análisis de la condición semiológica y fenomenológica de la Arquitectura contemporánea**

A partir del previo análisis, es posible distinguir en la Arquitectura contemporánea una amplia reminiscencia del enfoque semiológico en su metodología de diseño, con una herencia proveniente de la ilustración a partir del establecimiento hegemónico de la razón sobre los sentidos en el desarrollo tecnológico y constructivo. Descartes, citado por [1, p. 35], uno de los representantes más importantes de ese movimiento, introdujo el sistema de coordenadas cartesianas u ortogonales espaciales; a partir de ello, consolidó una lógica que exigía significados objetivos, racionalizados bajo el yugo de la deducción y no de los sentidos [1], [2].

Es prácticamente la agenda racionalista la que marcó las directrices, no sólo para el Neoclasicismo, sino el camino hacia la modernidad. Bajo esta perspectiva, la razón y la lógica adquieren un valor mayor sobre los conocimientos no racionales provenientes de la percepción sensorial.

Es así como este paradigma cimbra las bases de la ciencia moderna causal, fundamentada en la síntesis matemática y diferencial, que brindaron mayor jerarquía e influencia social a las disciplinas ingenieriles, militares e industriales de la modernidad, así como las relacionadas con la computación en la primera etapa de la era digital contemporánea [8].

A pesar de que el objetivo de la ciencia moderna es afín a la posición materialista aristotélica del “ver para creer”, como una metodología donde la comprobación es

fundamental para la determinación de una verdad, se sustenta en una lógica no solo racionalista, sino también humanista, donde el camino para llegar a esa verdad es estructurado por la razón, las ideas, el pensamiento o la mente. Es decir, esta última afinidad se apega a la visión platónica idealista de comprensión de las cosas que se encuentran alrededor.

Estas relaciones paradójicas en el debate entre estos dos enfoques existen de manera constante. Por ejemplo, en un sistema social, económico y político de tipo imperialista, como lo fue la época medieval, sustentado por la religión y la nobleza, donde la espiritualidad y la teología jugaban un papel importante en las estructuras sociales desde una clara perspectiva idealista; con relación al arte, la postura era totalmente diferente, pues las manifestaciones eran intuitivas, con mayor cercanía al sentido háptico y mayor apego al cuerpo, a su escala como principio ordenador.

Fue entonces, cuando las cuestiones divinas y humanas encarnadas por la aristocracia y la iglesia se vieron desafiadas por los planteamientos de los ingenieros, militares e industriales, cuya influencia crecía. El paso desde lo que había sido la presencia del cuerpo humano como principio organizador -divino- de la Arquitectura a otro tipo de organización más mecánica de la misma se vio decisivamente impulsado por las argumentaciones (matemáticas) de Galileo. [1, p. 27]

Así, es posible verificar que estas relaciones dicotómicas se han reiterado de manera cíclica hasta la fecha. La época clásica era impulsada por la razón, sembró las bases de la filosofía y el arte era desarrollado bajo la matemática; en contraste la edad media, que se desarrolló a partir de la espiritualidad,



se impulsó artísticamente por la intuición y los sentidos.

Posteriormente el humanismo renacentista retoma la razón y el arte bajo la lógica de la precisión abstracta matemática; luego, tanto el manierismo como el barroco abrazan de nuevo a la creatividad espontánea, instintiva y corpórea. Es en el Neoclasicismo donde se desarrollan las bases de la democracia y la ciencia moderna, luego el Romanticismo busca romper ese paradigma a través de recuperar la importancia de los sentimientos, la pasión y la intuición; un conjunto de valores que parecieran alimentar y ser afines al carácter contestatario de la vida postmoderna.

Es importante mencionar que esta dicotomía cíclica no tiene un carácter lineal, sino es una estructura de mayor complejidad que muestra claras paradojas y contradicciones que hacen de su apreciación, un sistema rizomático más próxima a la epistemología y filosofía de Deleuze y Guattari [15].

El siglo XX comienza con transformaciones importantes en los modelos de vida de las personas a partir del avance tecnológico que la revolución industrial fomentó. Este periodo marco las pautas necesarias para que los medios de comunicación evolucionarán e impulsarán el desarrollo científico. El conjunto de estos fenómenos abrió paso a que se retomara la hegemonía del enfoque racional en un nivel radicalizado y paradigmático, que tuvo como cúspide el movimiento moderno.

Bajo la modernidad, el método científico se estableció como el modelo base para el desarrollo tecnológico. A pesar de que los medios de comunicación y la transferencia de información evolucionaron en ese lapso de tiempo, no fue hasta el inicio del siglo XXI que fueron lo suficientemente avanzados para tener un carácter de

accesibilidad inmediata y global, gracias a la tecnología digital y lo que hoy en día es conocido como el *Big Data* [8], [17].

Esta situación, condicionó el método científico de la modernidad a trabajar con poca información para resolver problemas complejos. Así, el racionalismo se mantuvo hegemónico sobre cualquier método sensitivo, intuitivo y heurístico, ya que era fundamental trabajar bajo la lógica matemática, abstracta y causal [8], [17], [18].

En términos de Arquitectura y Arte, la situación no fue diferente, el movimiento moderno fue el principal paradigma del siglo XX. A pesar de que el periodo culminó con movimientos contestatarios, la racionalidad fue la principal directriz para el desarrollo creativo del momento.

Ante esa racionalidad dominante, los aspectos semiológicos de la Arquitectura adquieren un valor importante en los principales exponentes de del movimiento moderno, los cuales siguen latentes en las manifestaciones arquitectónicas contemporáneas. El posmodernismo, como el principal antagonista del movimiento moderno, trajo de vuelta la necesidad de reflexionar sobre el valor de los aspectos fenomenológicos en la Arquitectura del siglo XXI.

Martin Heidegger, Michael Foucault y Jacques Derrida han expuesto que el pensamiento y la cultura de la modernidad no solo han continuado con el privilegio histórico de la vista, sino que han fomentado sus tendencias negativas. Cada uno a su manera han considerado el dominio de la vista en la era moderna como claramente diferente al de épocas anteriores. [19, p. 25] Los avances en la tecnología digital, así como el *Big Data* consecuente, también han permitido revalorar estrategias heurísticas e



intuitivas para la resolución de problemas complejos. Ya que la computadora, la inteligencia artificial y la robótica, se han convertido en medios autónomos importantes, que tienen la capacidad de recuperar información para resolver tareas inmediatamente, sin afectación en la economía de tiempo y costo [8], [18], [20], [21].

### **5. Sinergia entre los enfoques fenomenológicos y semiológicos de la Arquitectura de Kengo Kuma**

Como se expone anteriormente, al margen de la fricción existente entre los enfoques fenomenológicos y semiológicos en el desarrollo de la concepción arquitectónica, es posible distinguir arquitectos que han incorporado en su visión de diseño espacial estos dos aspectos de manera equilibrada y sinérgica, con una clara relación retroalimentativa entre los enfoques aplicados en la producción de sus propuestas arquitectónicas.

En este sentido, arquitectos modernistas-posmodernistas como Frank Lloyd Wright, Alvar Aalto y Louis Kahn destacan por relacionar la razón y los sentidos de manera ejemplar e inclusive con cualidades canónicas, tal como manifiesta Peter Eisenman [7] en su libro *Diez edificios canónicos: 1950-2000*.

En la contemporaneidad, arquitectos como Herzog & DeMeuron, Sou Fujimoto, Toyo Ito, o Kengo Kuma [10], muestran con su Arquitectura que los aspectos fenomenológicos y semiológicos son recursivos e integrales, de tal forma que ambas consideraciones epistemológicas consolidan de manera holística el diseño del espacio de un producto arquitectónico. Por otro lado, todos estos últimos arquitectos mencionados, con excepción de Kengo Kuma [10], abrazan la arquitectura

computacional sin problema alguno y de manera enérgica.

En el seguimiento de esta lógica, un ejemplo claro y amplio de esta sinergia arquitectónica aplicada de los enfoques debatidos, puede ser apreciada en la arquitectura de Kengo Kuma [10], que retoma del pasado aspectos técnico-constructivos artesanales heredados de la tradición japonesa, y los reinterpreta en manifestaciones contemporáneas arquitectónicas.

Tal reinterpretación refleja una clara inquietud por integrar elementos arquitectónicos que, por un lado, sean representativos y análogos a símbolos tanto constructivos como culturales con un latente carácter histórico (semiología); y por otro, reflejen a través la combinación de elementos arquitectónicas, organización y manejo de los materiales, remembranzas de carácter cognoscitivo y existencial, relacionados con la tradición japonesa y su añoranza (fenomenología).

Kengo Kuma [10], recuerda con sus proyectos la Arquitectura artesanal e intuitiva, con un carácter de autoconstrucción, y la refleja a través de la disposición de elementos consecutivamente agregados de materiales blandos, frágiles y accesibles, que buscan constreñir la necesidad de una lógica técnica e industrializada guiada por la matemática y la ciencia (Figura 5, 6).



**Figura 5.** Pabellón CLT *Park Harumi*. Tokio, 2019. Kuma, K. [22] (tomado de <https://static.designboom.com/wp-content/uploads/2020/11/kengo-kuma-CLT-park-harumi-tokyo-japan-designboom-05.jpg>).



**Figura 6.** Pabellón *Climbable Wooden*. Paris, 2015. Kuma, K. [23] (tomado de [https://static.dezeen.com/uploads/2015/10/Yure\\_Kengo-Kuma-The-Galerie-Philippe-Gravier-dezeen-936-11.jpg](https://static.dezeen.com/uploads/2015/10/Yure_Kengo-Kuma-The-Galerie-Philippe-Gravier-dezeen-936-11.jpg)).

## 6. Implementación de aspectos fenomenológicos y semiológicos en la Arquitectura computacional

Terzidis [24] abre camino al desarrollo teórico de su libro *Algorithmic Architecture*,

y expresa que, a partir del traslado del uso de herramientas manuales a las computacionales en la Arquitectura, existe una preocupación en este el ámbito a nivel internacional por la posible pérdida de control de los arquitectos sobre sus propios diseños. Este planteamiento se dirige hacia una problemática de desconexión entre el diseñador y sus proyectos.

Aunque la respuesta a este problema la dirige a la manera de usar la inteligencia artificial de la computadora; profundizar en estas desconexiones y discernirlas tiene importancia en el desarrollo metodológico de la Arquitectura computacional.

Esta problemática, por tanto, se aproxima a una cuestión de desapego que puede recaer en distintos enfoques relacionados con el proceso de diseño y el uso de las tecnologías computacionales.

Un enfoque se relaciona con la falta de apego de la realidad arquitectónica desde la perspectiva de la experiencia física o material, con una connotación fenomenológica; es decir, una desconexión sensorial, especialmente háptica, que trae como consecuencia una falta de empatía espacial al momento de generar las variables tectónicas que repercuten psicofísicamente en el usuario de un proyecto.

Las imágenes por ordenador tienden a aplanar nuestras magníficas, multisensoriales, simultáneas y sincrónicas capacidades de imaginación al convertir el proceso de proyecto en una manipulación visual pasiva, un viaje retiniano. El ordenador crea una distancia entre el hacedor y el objeto, mientras que el dibujo a mano, así como trabajar con maquetas, colocan al proyectista en un contacto háptico con el objeto o espacio [19, p. 14].



Otro enfoque, derivado del anterior, se relaciona con la metodología arquitectónica y el carácter semiológico que puede tener, cuando se considera el diagrama como una herramienta fundamental en el proceso creativo y expresivo de diseño, con el fin de dar un fuerte valor a las ideas o conceptos para dar respuesta a los problemas.

Una visión idealista y predominantemente racional puede promover resultados alienados con el cuerpo humano, con probabilidades inconscientes de falta de apego a la realidad arquitectónica.

Los diagramas se han convertido en emblemas del cambio de siglo [...] Su versatilidad ha jugado a su favor, pero sus tentaciones conceptuales, abstractas y simplificadoras pueden conducir a procesos y resultados forzados [...] podemos valorar tanto su versatilidad y su capacidad de transmitir ideas, actividades, intenciones y complejidades como sus riesgos de caer en el formalismo y la arbitrariedad. [6, p. 91]. Estos enfoques, que evidencian una problemática con la arquitectura computacional, abren un debate en el que la solución depende del nivel logrado de equilibrio y sinergia entre los aspectos fenomenológicos y semiológicos anteriormente descritos en el desarrollo del espacio arquitectónico.

Una aproximación metodológica consolidada, en la que se incorpore el análisis de los aspectos fenomenológicos y semiológicos como consideraciones importantes en el proceso de diseño arquitectónico con enfoque Algorítmico Paramétrico (AP), es el propuesto por Patrik Schumacher [25], [26] en los títulos *Autopoiesis of Architecture Vol.I: a new framework for architecture* y *Autopoiesis of Architecture Vol.II: a new agenda for architecture*.

En ellos define el marco teórico y metodológico del “Parametricismo”, una tendencia de diseño que tuvo fuerza en la primer era digital de la arquitectura, etapa denominada por Carpo [8] en su libro *The Second Digital Turn: design beyond intelligence*.

Schumacher describe a la Arquitectura como un **sistema de operaciones, procesos y estructuras de comunicación**, que consolidan una agenda para calificar **condiciones de organización y articulación** en el proceso de diseño, para de esta forma ejercer relaciones físicas (en relación con la organización) y relaciones cognitivas (relacionadas con la articulación). Las primeras relaciones analizan **los patrones** y las cognitivas distinguen condiciones **fenomenológicas** (de percepción) y **semiológicas** (de significación).

Por otro lado, y de manera más reciente, existen un enfoque en el marco de la Arquitectura computacional, no solo relacionado con los procesos AP, sino también con la fabricación digital y la automatización llamado “Discretismo” por Morel [27].

Esta aproximación es una de las visiones más vanguardistas del uso de la tecnología digital en la Arquitectura y fue propuesta por los arquitectos Gilles Retsin [9], [20], Philippe Morel [27], José Sánchez [21], [28] en la publicación *Discrete* de la revista inglesa *Architectural Design* [9]. Es considerada por Carpo [8], [17], [18] como parte de las manifestaciones de la segunda era digital en la Arquitectura.

También es posible posicionar este enfoque dentro de un ámbito político, y no solo como una expresión tecnológica, ya que aboga por una economía de escala en la manera de utilizar los elementos que servirán de

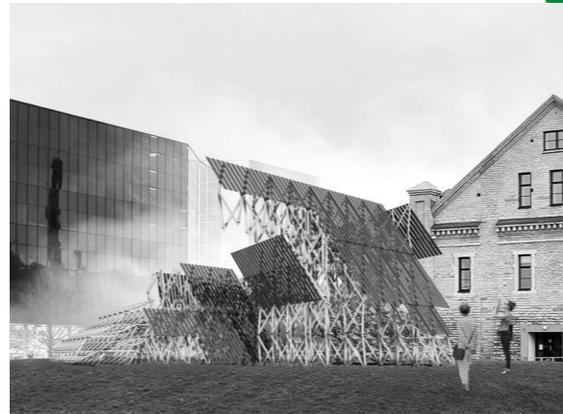


insumo en la producción arquitectónica, bajo una estrategia de agregación consecutiva. “*Discreteness*’ es una noción que proviene de las ciencias, que se refiere a lo que es individual y separado. Es lo opuesto a lo continuo, a lo que es ininterrumpido y fluido” [9, p. 8].

El Discretismo es una manifestación arquitectónica de carácter tectónico discontinuo, esquelético y fragmentado con articulaciones sincopadas, que acepta la repetición de un elemento estándar, como cajas dispuestas a manera de *voxels*, en un sistema de agregación consecutivo con crecimiento abierto y orgánico (Figura 7-9); un criterio contrario a la continuidad fluida y curvilínea de la estética parametricista de Schumacher [25], [26].



**Figura 7.** Tallin Architecture Biennale Pavilion de Gilles Retsin [29], proyecto construido. Tallin, 2017 (tomado de <https://www.retsin.org/Tallin-Architecture-Biennale-Pavilion>).



**Figura 8.** *Combinational Nest*, Tallin Architecture Biennale Pavilion de José Sánchez [30]. Tallin, 2019 (tomado de <https://www.plethora-project.com/combinatorial-nest>).



**Figura 9.** *Bloom*, 2012 Olympic Games, pabellón de José Sánchez y Alisa Andrasek [31]. Londres, 2012 (tomado de <https://www.plethora-project.com/bloom>).

Es posible discernir una afinidad entre las manifestaciones arquitectónicas de este enfoque vanguardista y las del arquitecto Kengo Kuma [10], a pesar de que existe una brecha amplia de pensamiento y criterio entre ambos. Kuma rechaza firmemente la experimentación computacional, tecnológica y científica, ya que va en contra de su filosofía y visión de la Arquitectura; el Discretismo ve la tecnología digital y los avances en la robótica, como el medio en el que se desenvuelve su producción arquitectónica.

A pesar del paralelismo, hay una cercanía clara en la tectónica resultante de sus productos arquitectónicos. También en sus



discursos existe un enemigo común: la modernidad industrial y la lógica matemática diferencial como método para la resolución de problemas. Kuma aboga por recuperar los aspectos intuitivos de los procesos artesanales, y el Discretismo se apoya en las lógicas heurísticas para la solución de problemas a través de la automatización [9], [20], [21], [28], que implica procesos de inteligencia artificial y robótica como métodos característicos de la segunda era digital de la arquitectura [17], [18].

En este sentido, las características del discurso de diseño del Discretismo pueden promover a través de sus métodos computacionales, la construcción eficiente y optimizada de elementos distribuidos consecutivamente mediante un sistema de agregación, que aporten en una relación sinérgica de los aspectos fenomenológicos y semiológicos, tal como lo demuestra la Arquitectura de Kengo Kuma [10].

### **7. Metodología algorítmica – paramétrica para la sinergia de los aspectos fenomenológicos y semiológicos**

La vanguardia computacional en la Arquitectura considera los procesos de programación digital como medio para la producción de proyectos arquitectónicos, en especial el segmento relacionado con la programación digital visual. Las principales plataformas de programación visual en la actualidad son *Grasshopper* del programa computacional CAD (*Computer Aided-Design*) *Rhinoceros 3d*, *Dynamo* del programa computacional *BIM Revit* de Autodesk y el programa computacional multiplataforma *Vectorworks*.

De las plataformas mencionadas anteriormente, la más utilizada y ampliamente desarrollada en la actualidad es *Grasshopper*, la cual es un entorno de

programación computacional visual (*Graphical User Interface*, GUI) del programa computacional CAD *Rhinoceros*. Funciona como un editor de algoritmos que construye modelos paramétricos a través de diagramas de flujo. Según Anton y Tănase [32]:

*Grasshopper* permite a arquitectos e ingenieros a desarrollar algoritmos para diseño edificaciones sistemas basados en sistemas paramétricos. Las posibilidades de programación e interoperabilidad con otros programas de análisis, *Grasshopper* es extendido por una serie de implementos (*plugins*) dedicados al análisis energético, tales como *GECO*, *Diva* para *Rhino* y *Ladybug*. (p. 12)

A través de esta plataforma, y de acuerdo con las consideraciones de implementación de los aspectos fenomenológicos y semiológicos de Patrik Schumacher [25], [26], así como la agenda del enfoque Discretista en la Arquitectura computacional, es posible proponer un esquema metodológico que sintetice los pasos y variables a tomar en cuenta en el diseño arquitectónico, para el desarrollo de un proyecto a través de un proceso AP (Figura 10).

Esta propuesta metodológica de Arquitectura Algorítmica Paramétrica (AAP), es un algoritmo que refleja los aspectos a considerar para el proceso de diseño de la forma y el espacio desde la perspectiva fenomenológica y semiológica.

Parte de la visión de Schumacher [25], [26] que considera estos aspectos como un sistema de estructuras de comunicación para calificar las relaciones de organización y articulación de la forma y el espacio. También considera los principales elementos teóricos y metodológicos de Norberg-Schulz [2], [3] en torno a la



topología, y los aspectos de percepción sensorial de Bloomer y Moore [1] previamente descritos.

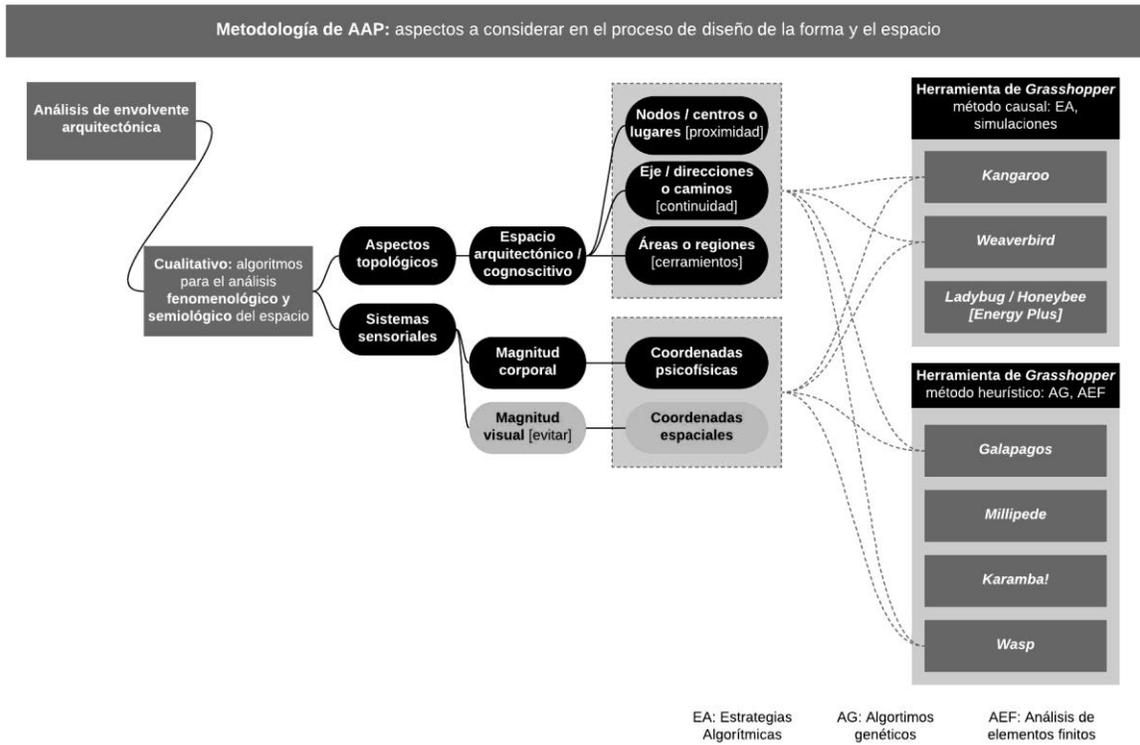
Finalmente, el diagrama relaciona estos elementos con las principales herramientas algorítmicas existentes en la plataforma de programación visual *Grasshopper*. Dichas herramientas son distinguidas en dos grupos: (a) aquellas que generan simulaciones y dan solución a problemas mediante el método causal y matemático, y (b) las que siguen el método y lógica heurística de la inteligencia artificial de la computadora para optimizar el desempeño de los productos arquitectónicos.

En el primer grupo, se encuentran herramientas de simulación y cálculo de elementos estructurales, físicas de partículas y elementos, análisis ambiental y energético. El segundo grupo engloba utilidades para optimización multiobjetivo a través de algoritmos genéticos, análisis de elementos finitos y búsquedas estocásticas. Un ejemplo de las herramientas previamente descritas es la utilidad *Wasp*, la cual corresponde al grupo de método heurístico. Es un conjunto de funciones algorítmicas que permiten desarrollar patrones de crecimiento y agregación a través de secuencias estocásticas.

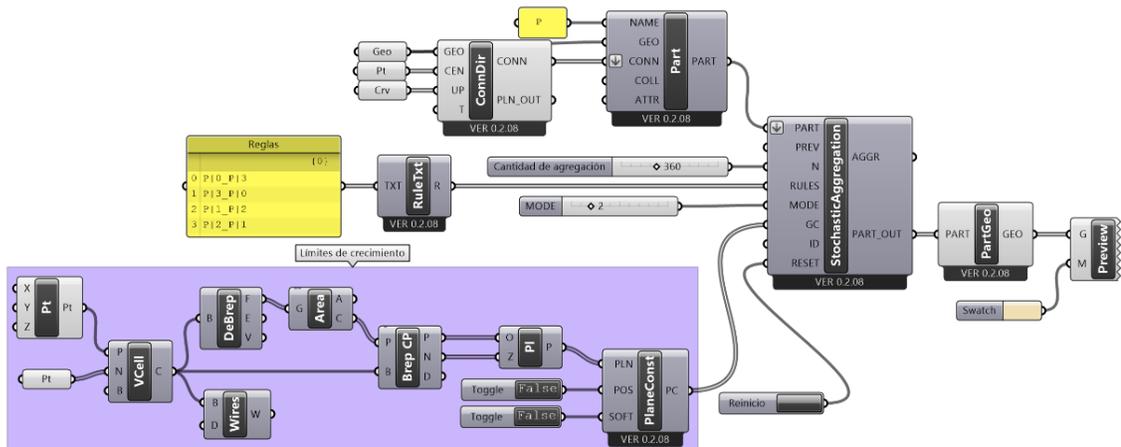
A través de un conjunto de reglas determinadas por el usuario en el algoritmo, se generan múltiples directrices de crecimiento a través de multiplicar consecutivamente uno o varios elementos geométricos.

Básicamente el algoritmo (Figura 11) se construye al determinar una geometría como parámetro, al cual se le establecen condiciones de conexión y se le reconoce como una entidad con propiedades a través de una función clasificadora que lo prepara para ser multiplicado.

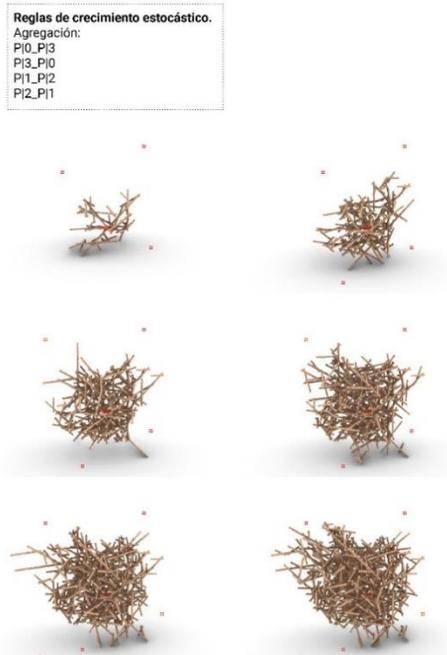
El parámetro clasificado es vinculado con una función de agregación consecutiva a través de un patrón de búsqueda estocástica, al cual se le establece reglas de repetición y acoplamiento. En esta función es posible estipular la cantidad de elementos a repetir, así como parámetros que limiten su crecimiento en tercera dimensión. Finalmente, el resultado es mostrado a través de funciones que permiten visualizar la geometría resultante y manipular su color. Esta herramienta, es un medio para desarrollar estructuras formales y espaciales arquitectónicas, de manera ágil, controlada y optimizada con características similares a las promovidas por el arquitecto Kengo Kuma [10] o la agenda del Discretismo previamente descritas (Figura 12 y 13).



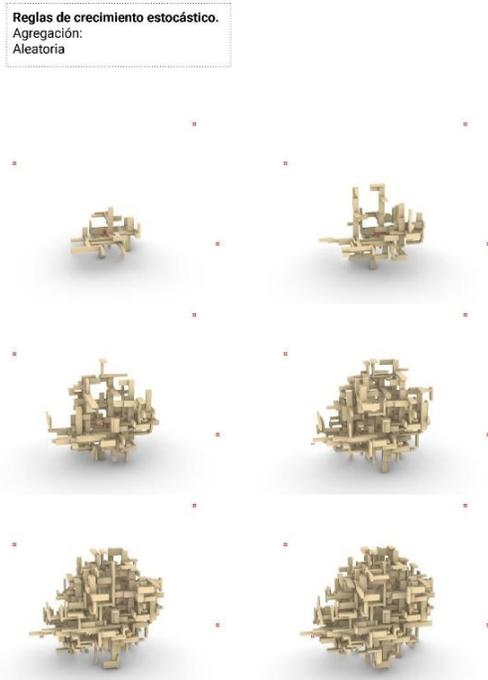
**Figura 10.** Propuesta metodológica de Arquitectura Algorítmica Paramétrica (AAP) para el diseño de la forma y el espacio a través de herramientas algorítmicas visuales. Elaboración propia (2020).



**Figura 11.** Ejemplo de algoritmo realizado en *Grasshopper* con la herramienta *Wasp* para el desarrollo de crecimiento múltiple de elementos a través de agregación. Elaboración propia (2020).



**Figura 12.** Resultado de algoritmo mostrado en *Figura 12*, muestra las variantes de agregación al multiplicar un elemento geométrico a través de reglas establecidas por el usuario. Elaboración propia (2020)



**Figura 13.** Resultado de algoritmo mostrado en *Figura 12*, muestra las variantes de agregación al multiplicar un elemento geométrico (ejemplar 2) a través de reglas establecidas por el usuario. Elaboración propia (2020)

## 8. Discusión

Las principales críticas en torno a la Arquitectura computacional tienen un origen más amplio y complejo del que pudiera discernirse a simple vista. Como es posible concluir a partir del análisis descriptivo anterior, el debate proviene de una tradición conflictiva entre la Filosofía materialista e idealista, del predominio de la razón o de los sentidos en el desarrollo creativo, de la fricción existente entre los aspectos fenomenológicos y semiológicos en el desarrollo arquitectónico.

El escepticismo hacia el uso de la computadora en la Arquitectura, gira en torno a la preocupación por la pérdida de control sobre el diseño como dice Terzidis [24], pero también por una inquietud relacionada con el desapego a la realidad, una patología que deriva de la alienación espacial producida por la realidad virtual, que promueve el excesivo uso del sentido de la vista y la lejanía del sistema sensorial háptico.

Tras un largo período, el escepticismo de Christopher Alexander era típico de muchos arquitectos. Muchos sentían que los ordenadores mecanizarían el proceso de diseño, dejando poco espacio para la intuición y el talento personal, elementos considerados como ingredientes básicos de una buena Arquitectura. [33, p. 119].

En el orden teórico previamente descrito, con relación a los aspectos fenomenológicos de la arquitectura, Pallasmaa [19] muestra una seria preocupación por el uso de la computadora, considera que promueve una manipulación visual pasiva y un viaje retiniano. De la misma manera Montaner [6], advierte que la radicalización del uso de la computadora en el proceso de diseño, ha propiciado formas y espacios arbitrarios y poco relacionados con su contexto:



La radicalización de este cambio (de lo analógico a lo virtual) ha potenciado la eclosión de una “Arquitectura digital” [...] en la que las geometrías complejas y sinuosas, surgidas del mundo virtual en la pantalla, plantean una pretendida liberación de las formas y espacios mediante una arquitectura de redes y corrientes, fluidas y transparentes, líquidas y dinámicas, a veces arbitrarias y generalmente poco relacionadas con su contexto [6, p. 22].

Por otro lado, el arquitecto Peter Zumthor [4], [5] no manifiesta inquietudes enfocadas en el uso de la tecnología en sí (en este caso digital), sino que su preocupación principalmente se apoya en la aplicación de metodologías basadas en teorías, filosofías y aspectos semiológicos, como son los conceptos y el excesivo uso de diagramas que pudieran fomentar un desapego con la realidad y su inherente capacidad de generar estímulos sensoriales a partir de su cualidad material y espacial.

Es importante analizar el contexto en el que se ha desarrollado la Arquitectura computacional. Primeramente, la computadora es usada intensivamente como una herramienta representacional, en definitiva, esta manera promueve una patología de desapego y alienación espacial.

Sin embargo, el avance tecnológico y la accesibilidad pedagógica actual con relación a la computadora, ha traído como consecuencia otro enfoque de uso, en el cual deja de ser comprendida como una herramienta pasiva de dibujo y proyección virtual, para convertirse en un aliado activo en la concepción de la forma y espacio, gracias al aprendizaje de la programación digital como un medio de comunicación amplia con una inteligencia artificial, cada vez más avanzada.

Actualmente la inteligencia artificial, alimentada por los sistemas de intercomunicación global gracias al Internet y el *Big Data* [8], [17], [18], se encuentra en un proceso de transformación de los modelos, no solo informáticos, sino de los métodos de investigación científica, que pasan de tener un carácter principalmente causal a otro de tipo heurístico.

Es decir, los recursos digitales actualmente generan posibilidades espaciales y arquitectónicas en toda la extensión de la palabra. Sin embargo, este hecho no deja de lado al hombre en un papel pasivo de participación en el diseño, no son un sustituto sino un complemento, ya que es responsabilidad del diseñador tomar decisiones en términos de designar el valor inherente que le da a los datos y parámetros que entran en juego en la programación digital de un proyecto.

La racionalización de los datos por parte del diseñador juega un papel activo y relevante en el proceso de diseño con el manejo de sistemas computacionales.

Para utilizar el ordenador como un instrumento que resuelve problemas en el proceso de diseño, se debe responder a la pregunta de Christopher Alexander sobre el uso del ejército estúpido. La naturaleza es proclive a los ejércitos de estúpidos, las hormigas son un ejemplo [...] se debe usar como una herramienta generativa que crea una lógica interna, la cual se puede desarrollar para producir una amplia gama de posibilidades [33, p. 119].

Por otro lado, con relación al debate entre la razón y los sentidos, así como el consecuente desapego con la realidad, es oportuno considerar esta problemática desde una perspectiva Deleuziana o rizomática, en lugar de dicotómica. Puede tomarse como ejemplo el símbolo de la



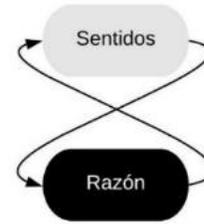
mitología nórdica de la serpiente que se come su propia cola: el Uróboro (Figura 14), como referencia de un sistema recursivo. Es decir, es más interesante considerar la razón como un aspecto recurrente de los sentidos o viceversa, que contrapuestos.



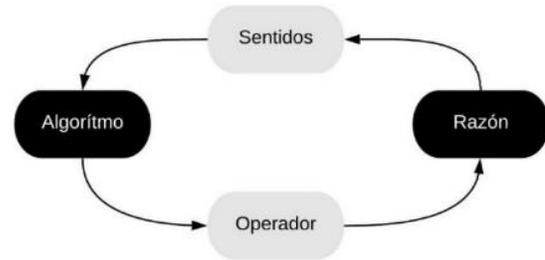
**Figura 14.** El Uróboro, la serpiente que come su propia cola (símbolo de la mitología nórdica) como referencia a la recursividad (tomado de <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ur%C3%B3boros&oldid=126403838>).

Finalmente, cualquier estímulo sensorial tiene que pasar por una evaluación mental, así como cualquier razonamiento o idea, no tiene significado si no es parte de un esquema cognoscitivo derivado de la interacción de los sistemas sensoriales y la envolvente corporal con los objetos físicos.

De la misma manera, en términos del uso computacional como inteligencia artificial; cualquier algoritmo generado, necesariamente tiene que pasar por el juicio, supervisión y creación del operador y del valor que éste da a cada parámetro y función asignada (Figura 15 y 16).



**Figura 15.** El Uróboro: recursividad entre los sentidos y la razón. Elaboración propia (2020).



**Figura 16.** El Uróboro: recursividad entre los sentidos y la razón, entre el algoritmo y el operador. Elaboración propia (2020).

## 9. Conclusiones

El presente análisis de los aspectos fenomenológicos y semiológicos de la Arquitectura computacional verifica y evidencia los principales problemas y potencialidades relacionadas con el uso de los medios digitales en el proceso de diseño arquitectónico.

Aborda las principales críticas existentes en torno al cada vez más necesario uso de las computadoras como herramienta o medio de producción en la Arquitectura, las cuales manifiestan una preocupación por promover una patología de alienación de la realidad en el entendimiento del espacio desde la perspectiva fenomenológica, a costa de un dominio latente de un enfoque semiológico, idealista o virtual.

Analiza con referentes especializados que una respuesta a esta patología es a través del modo de comprender y usar la computadora. Primeramente, ejemplifica con la



Arquitectura de Kengo Kuma [10] y el enfoque de Arquitectura computacional llamado Discretismo, que existen manifestaciones arquitectónicas que son equilibradas en considerar los aspectos fenomenológicos y semiológicos de manera sinérgica y recursiva.

Posteriormente, muestra que la computadora puede ser más participativa en el desarrollo de la forma y el espacio a través de la programación digital, y los mecanismos algorítmicos y paramétricos consecuentes de este proceso. Verifica con las aportaciones teóricas de Terzidis [24] y Schumacher [25], [26] que existen metodologías relacionadas con la Arquitectura computacional que abordan los aspectos fenomenológicos y semiológicos como parámetros a analizar en la metodología de diseño.

También, propone un esquema metodológico algorítmico y paramétrico que analiza e incorpora estos aspectos con una participación sinérgica y activa en el diseño arquitectónico, a través de herramientas algorítmicas que pueden ser utilizadas en la plataforma de programación visual llamada *Grasshopper*.

El esquema metodológico propuesto, funciona como un algoritmo que tiene el objetivo de incentivar el análisis de elementos que funcionan como parámetros de evaluación en un proyecto, en torno a los aspectos fenomenológicos y semiológicos de la arquitectura.

El algoritmo incorpora las consideraciones teóricas existenciales, relacionadas con el análisis topológico del espacio de Norberg-Schulz [2], así como la evaluación de los parámetros que estimulan sistemas sensoriales y la envolvente corporal, según Boomer y Moore [1] y Peter Zumthor [4], [5].

Finalmente, estas consideraciones son una referencia eficiente para conducir el análisis del espacio arquitectónico a un proceso de diseño Algorítmico-Paramétrico; y así dirigir al diseñador, a verificar herramientas algorítmicas útiles que, con ayuda de estrategias computacionales e inteligencia artificial, considere las propiedades cualitativas, existenciales y psicológicas del espacio a diseñar.

## 10. 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, soporte y guía en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

## 11. Reconocimiento de autoría

*Aarón Tadeo Onchi Rascón:* Conceptualización, Metodología, Software, Análisis Formal, Investigación, Escritura – Borrador original. *Alejandro José Peimbert Duarte:* Validación, Curación de Datos, Escritura: revisión y edición. *Jesús Antonio Ley Guing:* Recursos, Validación, Escritura: revisión y edición.



## Referencias

- [1] K. C. Bloomer y C. W. Moore, *Cuerpo, memoria y arquitectura: introducción al diseño arquitectónico*. Madrid: Hermann Blume, 1983.
- [2] C. Norberg-Schulz y C. N.- Schulz, *Existence, space & architecture*. London: Studio Vista, 1971.
- [3] C. Norberg-Schulz y A. Bonanno, *Arquitectura occidental: la arquitectura como historia de formas significativas*. Barcelona; México [D.F.: Gustavo Gili, 1999.
- [4] P. Zumthor, *Atmosferas: entornos arquitectónicos: las cosas a mi alrededor*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011.
- [5] P. Zumthor, *Pensar la arquitectura*. Barcelona: Gustavo Gili, 2016.
- [6] J. M. Montaner, *La condición contemporánea de la arquitectura*. Barcelona: GG, 2015.
- [7] P. Eisenman, *Diez edificios canónicos 1950-2000*. Barcelona: Gustavo Gili, 2011.
- [8] M. Carpo, *The second digital turn: design beyond intelligence*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2017.
- [9] G. Retsin, «Discrete Architecture in the Age of Automation», *Archit. Des.*, vol. 89, n.º 2, pp. 6-13, mar. 2019, doi: 10.1002/ad.2406.
- [10] K. Kuma y H. Watanabe, *Anti-object: the dissolution and disintegration of architecture*, Repr. London: Architectural Association Publ, 2010.
- [11] A. Tedeschi, *AAD - Algorithms-Aided Design: parametric strategies using Grasshopper*, First edition. Brienza: Le Penseur publisher, 2014.
- [12] M. M. Stadler, «¿Qué es la topología?», *Sigma Rev. Matemáticas Mat. Aldizkaria*, n.º 20, pp. 63-77, 2002, Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=803774>.
- [13] G. Scott, *La arquitectura del humanismo: un estudio sobre la historia del gusto*. Barral, 1970.
- [14] P. Zumthor, «Pabellón Swiss Sound - Ficha, Fotos y Planos», *WikiArquitectura*, 2000. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/pabellon-swiss-sound/> (accedido jun. 02, 2020).
- [15] G. Deleuze y F. Guattari, *Mil mesetas: capitalismo y esquizofrenia*, 5. ed. Valencia: Pre-Textos, 2002.
- [16] G. Deleuze y F. Guattari, *El anti-edipo: capitalismo y esquizofrenia*. Barcelona: Paidós, 2017.
- [17] M. Carpo, *The alphabet and the algorithm*. Cambridge, Mass: MIT Press, 2011.
- [18] M. Carpo, «Particlised: Computational Discretism, or The Rise of the Digital Discrete», *Archit. Des.*, vol. 89, n.º 2, pp. 86-93, mar. 2019, doi: 10.1002/ad.2416.
- [19] J. Pallasmaa, *Los ojos de la piel: la arquitectura y los sentidos*, 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2014.
- [20] M. Linder, M. Claypool, M. Jimenez Garcia, G. Retsin, V. Soler, y Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, *Robotic building: architecture in the age of automation*. 2019.
- [21] J. Sanchez, *Architecture for the commons*. New York: Routledge, 2020.
- [22] K. Kuma, «kengo-kuma-CLT-park-harumi-tokyo-japan-designboom-05.jpg (818x1226)», 2019. <https://static.designboom.com/wp-content/uploads/2020/11/kengo-kuma-CLT-park-harumi-tokyo-japan-designboom-05.jpg> (accedido ene. 08, 2021).
- [23] K. Kuma, «Yure\_Kengo-Kuma\_The-Galerie-Philippe-Gravier\_dezeen\_936\_11.jpg (936x624)», 2015. [https://static.dezeen.com/uploads/2015/10/Yure\\_Kengo-Kuma\\_The-Galerie-Philippe-Gravier\\_dezeen\\_936\\_11.jpg](https://static.dezeen.com/uploads/2015/10/Yure_Kengo-Kuma_The-Galerie-Philippe-Gravier_dezeen_936_11.jpg) (accedido abr. 07, 2021).
- [24] K. Terzidis, *Algorithmic architecture*, 1st ed. Amsterdam ; Boston: Architectural Press, 2006.
- [25] P. Schumacher, *The autopoiesis of architecture. Vol. 1: A new framework for architecture*. Chichester: Wiley, 2011.
- [26] P. Schumacher, *The autopoiesis of architecture. Vol. 2: A new agenda for architecture*. Chichester: Wiley, 2012.
- [27] P. Morel, «The Origins of Discretism: Thinking Unthinkable Architecture», *Archit. Des.*, vol. 89, n.º 2, pp. 14-21, mar. 2019, doi: 10.1002/ad.2407.
- [28] J. Sanchez, «Architecture for the Commons: Participatory Systems in the Age of Platforms», *Archit. Des.*, vol. 89, n.º 2, pp. 22-29, mar. 2019, doi: 10.1002/ad.2408.
- [29] G. Retsin, «Tallinn Architecture Biennale Pavilion - www.retsin.org», *gilles retsin*, 2017. <https://www.retsin.org/Tallinn-Architecture-Biennale-Pavilion> (accedido abr. 27, 2020).
- [30] J. Sanchez, «Combinatorial Nest for Tallin Pavilion Program, Tallin Architecture Biennale 2019», *Plethora Project*, 2019. <https://www.plethora->



- project.com/combinatorial-nest (accedido may 10, 2020).
- [31] J. Sanchez y A. Andrasek, «Bloom», *Plethora Project*, 2012. <https://www.plethora-project.com/bloom> (accedido abr. 07, 2021).
- [32] I. Anton y D. Tănase, «Informed Geometries. Parametric Modelling and Energy Analysis in Early Stages of Design», *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 9-16, ene. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.269.
- [33] J. Krauel, *Arquitectura digital: innovación y diseño*. Barcelona: Links, 2011.



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 numérico de la dispersión de un contaminante a través de un medio poroso simplificado

## *Numerical analysis of the dispersion of a contaminant through a simplified porous medium*

Lucia A. Morales-Arévalo <sup>1</sup>, René Sanjuan-Galindo <sup>1</sup>, Norma Alicia Ramos-Delgado <sup>2</sup>, Oscar Adrián Morales-Contreras <sup>3</sup>, Ana Teresa Mendoza-Rosas <sup>4</sup>, Alejandro Alonzo-García <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación e Innovación Tecnológica-Instituto Tecnológico de Nuevo León-Tecnológico Nacional de México, Av. De la Alianza No. 507, interior del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT).

Km. 10 de la Autopista al Aeropuerto Internacional Mariano Escobedo. Apodaca, Nuevo León C.P. 66629

<sup>2</sup>CONACyT-Centro de Investigación e Innovación Tecnológica-Instituto Tecnológico de Nuevo León-Tecnológico Nacional de México, Av. De la Alianza No. 507, interior del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT). Km. 10 de la Autopista al Aeropuerto Internacional Mariano Escobedo. Apodaca, Nuevo León C.P. 66629

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario no. 1000 C.P. 21500, Unidad valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México

<sup>4</sup>CONACYT - Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Santiago Tapia 403, 58000, Morelia, Michoacán, México.

**Autor de correspondencia:** *Alejandro Alonzo García*, CONACyT-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Nuevo León-Centro de Investigación e innovación Tecnológica. Av. De la Alianza No. 507, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, Autopista al Aeropuerto Internacional Mariano Escobedo Km. 10, Apodaca Nuevo León. C.P. 66629, México. E-mail: [alejandro.ag@nuevoleon.tecnm.mx](mailto:alejandro.ag@nuevoleon.tecnm.mx), ORCID: 0000-0002-0911-1626.

**Recibido:** 07 de Junio del 2021

**Aceptado:** 17 de Junio del 2021

**Publicado:** 29 de Junio del 2021

**Resumen.** – *Se presenta el análisis numérico de la dispersión de un contaminante gaseoso en un medio poroso infinito formado de un arreglo ordenado de partículas con diferentes razones de diámetros (DR). El intervalo cubierto fue  $0.2 < DR < 0.8$ , el cual corresponde a variaciones sistemáticas en el grado de expansión-contracción de las trayectorias de poro, no incluidos en modelos convencionales. Las porosidades ( $\phi$ ) correspondientes a los DR, cubrieron el intervalo  $0.27 < \phi < 0.72$ . El número de Reynolds de poro ( $Re$ ) fue igual a  $50 \times 10^3$ , correspondiendo a un flujo turbulento completamente desarrollado. Los resultados mostraron que para el caso de  $DR=0.2$  y  $\phi=0.27$ , se forman estructuras de flujo recirculantes y elongadas, las cuales cubren los espacios intersticiales en los poros, provocando una intensificación de la dispersión del trazador y un menor tiempo de homogeneización. En los modelos de mayor DR y menor  $\phi$ , aunque las velocidades locales fueron mayores, las estructuras rotacionales fueron inhibidas y el tiempo de homogeneización aumentó. Considerando que los modelos de mayor  $\phi$  contienen menor cantidad de fase sólida, dicho efecto, puede ser considerado para optimizar el funcionamiento de dispositivos ingenieriles tales como aletas de enfriamiento, arreglos de tubos en intercambiadores de calor y mezcladores estáticos entre otros.*

**Palabras clave:** Medio poroso; Flujo turbulento; Dispersión de contaminante.



**Abstract.** - *It is presented the numerical analysis of the pollutant dispersion in porous media composed of infinite arrays of particles with different diameter ratios (DR). The DR ranged from 0.2 to 0.8, representing several degrees of expansion-contraction of the pore paths, not included in previous models. The corresponding porosities ( $\phi$ ) covered the interval  $0.27 < \phi < 0.72$ , and the pore Reynolds number was set to  $50 \times 10^3$  which represented fully developed turbulent conditions. Results showed that for the case of  $DR=0.2$  and  $\phi=0.27$ , the wake structures behind the smaller particles are elongated along the gap spaces between particles, enhancing hence, the tracer dispersion. Oppositely, for the highest DR case, the porosity is lower and although the local velocities are high, the wake behind smaller particles are disrupted, and the homogeneity time increased drastically. Thus, eddy structures inside pore domains plays a key role in the dispersion of a tracer. Taking into account that domains with large  $\phi$  contain less solid phase, this effect could be considered in the optimization of several engineering devices as cooling fins, arrays of tubes in heat exchangers and static mixers to mention a few.*

**Keywords:** Porous media; Turbulent flow; Pollutant dispersion.

## 1. Introducción

El análisis de los patrones de flujo turbulento es importante en diversos dispositivos de ingeniería. Esto es debido a que potencian los fenómenos de transferencia de calor, mezclado, promueven las reacciones químicas, etc. En relación con la ingeniería ambiental, muchos fenómenos de flujo turbulento ocurren en el seno de un medio poroso. Ejemplos de esto son: catálisis, transporte de contaminantes en suelo, transporte de contaminantes en medios urbanos, mezcladores estáticos e intercambiadores de calor. Existen diferentes técnicas experimentales útiles para medir las velocidades medias y fluctuantes propias del régimen turbulento. Sin embargo, en un medio poroso, la implementación de dichas técnicas es complicada y costosa debido a la presencia de las paredes sólidas del medio. Un ejemplo de lo anterior es la anemometría de hilo caliente, la cual consiste en medir indirectamente las velocidades de acuerdo al enfriamiento de un pequeño filamento en el cual se regula ya sea el voltaje o la corriente. El posicionamiento de esta técnica en un medio poroso es complicado siendo el instrumento intrusivo para el medio. En relación a técnicas como la velocimetría de imágenes de partículas, o la velocimetría por láser Doppler, ambas técnicas requieren de paredes y fluidos con el

mismo índice de reflexión [1], [2]. Por tales razones, la dinámica de fluidos computacionales (DFC) resulta una alternativa útil para tratar de entender el flujo turbulento en un medio poroso. Entre las opciones viables que la herramienta DFC ofrece, la simulación numérica directa resulta la técnica más poderosa para modelar el flujo turbulento. De acuerdo con esta técnica, es capaz de resolver la mayor parte del espectro existente de los modelos turbulentos, tanto espacial como temporalmente. Sin embargo, dado a que las escalas de disipación más pequeñas exigen una alta resolución espacial y temporal, los estudios de simulación numérica directa se basan en el uso de supercomputadoras y se han centrado en el rango inferior del régimen turbulento ( $Re > 5000$ ) [3].

Otra alternativa relativamente menos costosa es la Simulación de Grandes Remolinos (LES, por sus siglas en inglés). Esta técnica, resuelve los remolinos más grandes de forma directa, asumiendo que estos poseen la mayor cantidad de la energía cinética de flujo siendo que los más pequeños son modelados mediante cierto modelo a escala de submalla, usualmente bajo consideraciones de turbulencia isotrópica [4]. Sin embargo, para estudios que involucran múltiples casos, los requerimientos computacionales de la técnica LES siguen siendo muy grandes y son



poco viables. Por ejemplo, una simulación puede llevar 3 semanas ininterrumpidas y, adicionalmente se requiere un post-procesamiento las cantidades instantáneas para proporcionar valores promedio. En este sentido los modelos de Navier-Stokes promediados por Reynolds (RANS) se han aplicado en estudios paramétricos de medios porosos y han mostrado concordancia razonable con resultados obtenidos mediante DNS y LES [5]–[7], pero sin la necesidad de grandes recursos computacionales. Este enfoque contabiliza la turbulencia de manera promedio mediante la aplicación de dos ecuaciones de transporte adicionales en las ecuaciones de Navier-Stokes, una para la producción de energía cinética turbulenta ( $k$ ) y otra para su disipación ( $\varepsilon$ ), los cuales son conocidos como los modelos  $k$ - $\varepsilon$  y sus variantes. Al utilizar este procedimiento de promediado temporal, los términos de velocidad fluctuante son usados para obtener el tensor de esfuerzos de Reynolds, el cual luego es modelado utilizando una formulación de viscosidad de remolino [8].

En medios porosos, comúnmente se espera que estos modelos arrojen resultados insatisfactorios en las regiones cercanas a las paredes debido a que sus formulaciones no consideran la rápida atenuación de la velocidad en las zonas cercanas a la subcapa viscosa [9]. Para remediar esta deficiencia, se corrigen los modelos RANS originales aplicando funciones de amortiguación a los términos de producción y destrucción de la ecuación de transporte, así como en la viscosidad turbulenta. Dichas versiones modificadas son conocidas como modelos de turbulencia de bajo número de Reynolds (LRN). Para desarrollar modelos de turbulencia macroscópica de medios porosos repetitivos, por practicidad, las ecuaciones son resueltas en elementos representativos de volumen (ERV), discretizados cuidadosamente y bajo condiciones de periodicidad. La viabilidad de la simulación de la turbulencia al usar este enfoque ya ha sido confirmada en trabajos orientados a estructuras

porosas compuestas de arreglos repetitivos de elementos tales como cilindros cuadrados, fibras, lechos empacados, partículas esféricas, etcétera [10]–[13]. En estos trabajos, se han reportado diversas correlaciones entre el gradiente de presión macroscópico (MPG),  $k$  y  $\varepsilon$  como funciones de la porosidad y la geometría de las partículas en dominios porosos homogéneos compuestos de partículas de mismo diámetro.

Sin embargo, es bien sabido que un gran número de medios porosos con interés ingenieril no están siempre formados por elementos sólidos con la misma escala de longitud, sino por el contrario, éstos suelen estar formados por partículas de diferentes tamaños y posicionadas en diferentes configuraciones de dispositivo. Al respecto, recientemente se reportó una discusión de las velocidades, vorticidades y parámetros turbulentos para partículas de diferentes razones de diámetro [14]. Ahí se exploró el efecto de la relación de diámetro en el intervalo  $0.2 < DR < 0.8$  y la porosidad  $0.3 < \phi < 0.8$  en un amplio intervalo del régimen turbulento ( $500 < Re < 500 \times 10^3$ ). Aunque de manera intuitiva se reconoce que la dispersión de un trazador en un medio poroso depende tanto de las velocidades como de los patrones de flujo formados en las redes de fluido interconectadas, dicho parámetro no ha sido cuantificado de manera sistemática en modelos simples de medios porosos con diferentes DRs. En base a lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es estudiar las capacidades de dispersión de cuatro modelos distintivos de poros, en los cuales se variaron tanto las  $\phi$  como las  $DR$ . Lo anterior busca cuantificar las capacidades de mezclado en dichas geometrías simplificadas, en el cual los tamaños de partícula representan variaciones controladas en la expansión-contracción de los canales de poro. Considerando que las reacciones químicas, efectos de transferencia de calor y otros fenómenos dependientes de la difusión, pueden ser optimizados, este conocimiento puede servir para mejorar el juicio ingenieril en dispositivos tales



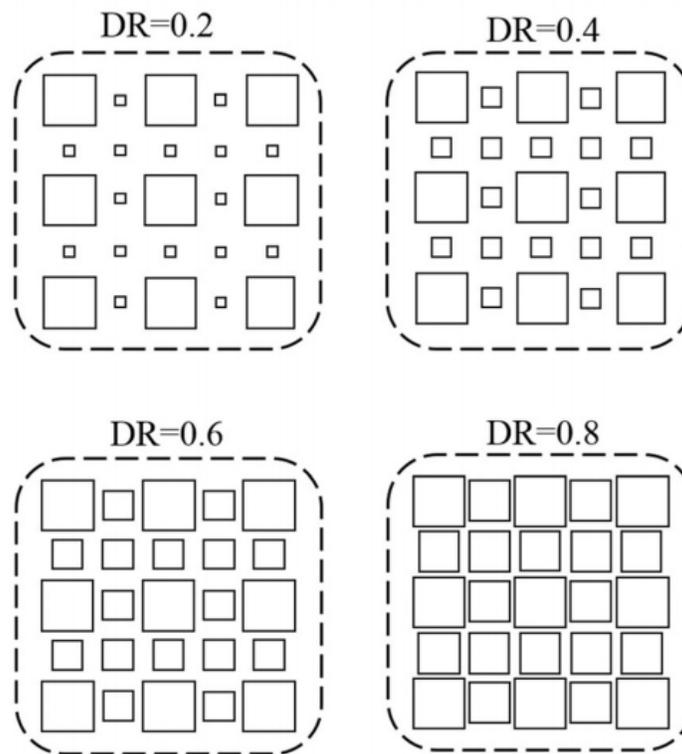
como intercambiadores de calor, mezcladores estáticos, reactores químicos, entre otros.

## 2. Método numérico

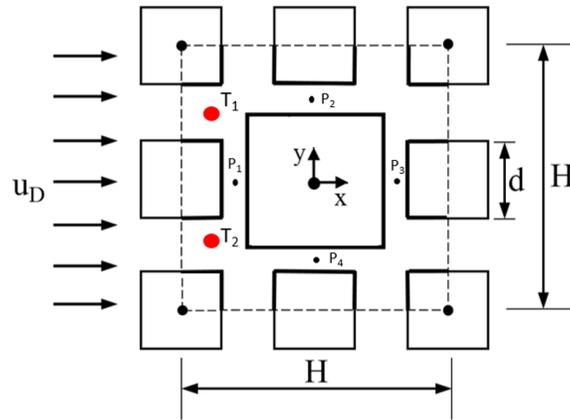
### 2.1 Modelos de poro y ERV

El medio poroso es modelado como un conjunto infinito, repetitivo y simétrico de cilindros cuadrados grandes rodeados de cilindros cuadrados más pequeños, como es ilustrado en la

Fig. 1. La altura del ERV ( $H$ ) fue igual a la unidad, y los diámetros de los cilindros grandes ( $D$ ) y pequeños ( $d$ ) tuvieron una relación de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8. Los valores correspondientes de  $\phi$  para dichos DR fueron de 0.72, 0.63, 0.48 y 0.27, respectivamente, los cuales se calcularon utilizando la ecuación  $\phi = 1 - (D^2 + 3d^2)/H^2$ . Un esquema de la configuración geométrica de los medios porosos se muestra en la Fig. 2.



**Figura 1.** Representación esquemática de las matrices porosas en función de la relación de diámetro, adaptada de Ref. [14].



**Figura 2.** Representación geométrica del medio poroso y posicionamiento de los trazadores y puntos de muestreo, adaptada de Ref. [14].

### 2.2 Ecuación de transporte del contaminante

Para calcular la mecánica de homogeneización del contaminante, se resolvió la ecuación de

transporte de un trazador de acuerdo a la Ecuación (1):

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} C) = \nabla \cdot (\rho D_m \nabla C - \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla C) \quad (1)$$

En esta ecuación  $C$  es la fracción de masa del contaminante,  $\mathbf{U}$  es el vector de velocidad promedio obtenida mediante la resolución del modelo RANS  $k-\epsilon$ ,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $D_m$  es la difusividad molecular,  $\mu$  se refiere a viscosidad turbulenta  $\mu_t$  y  $\sigma_t$  es el número de Schmidt turbulento. Los valores del campo de velocidades locales  $\mathbf{U}$ , fueron obtenidas de casos resueltos con anterioridad, descritos en la Ref. [14], para el caso  $Re = \rho u_D / \mu = 50 \times 10^3$ , siendo  $u_D$  la velocidad de Darcy del medio poroso. Los valores de las constantes aplicados en la ecuación del transporte del trazador son las mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Propiedades del trazador.

Parámetro	Unidades
$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
$D_m$	1.7551e-05 m <sup>2</sup> /s
$\mu$	1.72e-05 kg/(m·s)
$\sigma_t$	0.8

### 2.3 Inyección del contaminante, sus propiedades y cálculo del paso temporal

Para calcular los tiempos de homogeneización, fue necesario establecer 4 puntos de monitoreo, los cuales fueron colocados partiendo del eje central del dominio, posicionados de forma simétrica e inmersas en puntos donde se generan altos gradientes de velocidad y/o presión. Las coordenadas donde se localizaron dichos puntos de monitoreo son mostradas en la Tabla 2.



**Tabla 2:** Ubicación de puntos de monitoreo para cada DR.

<i>DR</i>	$\phi$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
0.2	0.72	(-0.35, 0)	(0, 0.35)	(-0.35, 0)	(0, -0.35)
0.4	0.63	(-0.325, 0)	(0, 0.325)	(0.325, 0)	(0, -0.325)
0.6	0.48	(-0.3, 0)	(0, 0.3)	(0.3, 0)	(0., -0.3)
0.8	0.27	(-0.275, 0),	(0, 0.275),	(0.275, 0)	(0, -0.275)

Con el propósito de simular la dispersión del contaminante, se colocaron dos parches circulares  $T_1$  y  $T_2$  de radio igual a  $0.0125D$  y con una concentración volumétrica igual a  $1.0$ . Estos parches, se posicionaron a  $0.1H$  a partir de la entrada izquierda del dominio. Un esquema ilustrativo de estos puntos es mostrado en la Fig. 2. Las propiedades del contaminante fueron ajustadas de tal manera que se obtuviera un número de Schmidt de  $0.8$  para todos los casos, el cual es cercano al valor  $0.84$  reconocido para el monóxido de carbono (CO).

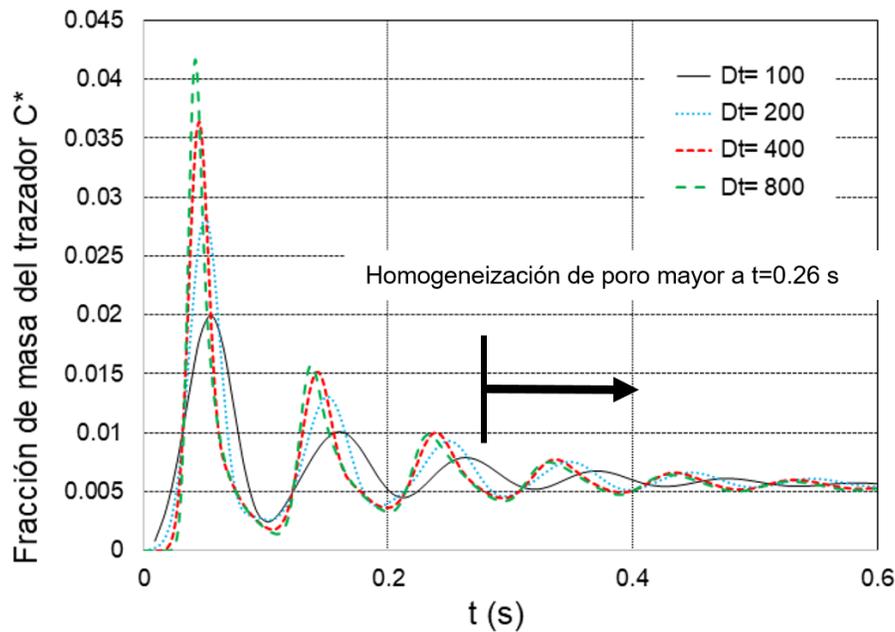
#### 2.4 *Análisis de la influencia del paso temporal*

La ecuación diferencial del transporte del trazador (Ecuación 1) es dependiente del tiempo, por lo cual fue necesario determinar un paso temporal ( $\Delta t$ ) óptimo que permitiera reproducir la

evolución temporal del trazador. Con la finalidad de encontrar dicho valor, se probaron diferentes números de secuencias temporales  $D_t=100, 200, 400$  y  $800$  en cada tiempo de residencia ( $H/u_D$ ) como lo muestra la Ecuación (2).

$$\Delta t = H / (D \cdot u_D) \quad (2)$$

El modelo seleccionado para este análisis fue el de  $DR=0.8$ , puesto que es el punto que tiene mayores magnitudes de velocidades y pérdidas de flujo por caída de presión y fricción de acuerdo a lo reportado en la Ref. [14]. La Fig. 3, muestra la evolución temporal del trazador obtenida en el punto de monitoreo  $P_2$  para las diferentes  $D_t$  evaluados. Se puede apreciar que exceptuando para el valor  $D_t=100$ , los otros casos presentaron un comportamiento bastante similar



**Figura 3.** Evolución temporal del trazador en el punto de monitoreo P2 para diferentes valores de número de pasos temporales por tiempo de residencia.

La desviación máxima porcentual entre  $D_t=400$  y  $D_t=800$  fue de aproximadamente 13.5 % para  $t=0.044$  s. Este error disminuyó al 5% en  $t=0.14$  s alcanzando un mínimo de menos del 1 % en  $t=0.26$  s. Considerando que la homogeneización del trazador dentro del poro se lleva a cabo en instantes posteriores a  $t > 0.26$  s y considerando que entre  $D_t=400$  y  $D_t=800$  los pasos temporales requeridos son el doble, se eligió el valor  $D_t=400$ . Lo anterior permitió optimizar el recurso de cómputo aplicado en el resto de las simulaciones de una manera relativamente conservadora.

### 2.5 Cálculo de la uniformidad y el tiempo de homogeneización de poro

Se normalizaron los datos recopilados por cada punto de monitoreo de acuerdo a la Ecuación (3).

$$c^*(t) = \frac{w_t(t)}{w_t(t_\infty)} \quad (3)$$

En esta relación,  $c^*(t)$  representa la concentración adimensional en el tiempo  $t$ ;  $w_t(t)$  es la fracción de masa de trazador en función del tiempo; y  $w_t(t_\infty)$  es la fracción de masa del trazador final de la simulación. El cálculo de la uniformidad de dispersión de los poros fue obtenido con base en la Ecuación (4).

$$U = 1 - \frac{\sigma_{c^*(t)}}{c^*(t)} \quad (4)$$

Aquí,  $\sigma_{c^*(t)}$  es la desviación estándar de la curva de concentración promedio normalizada (obtenida de los cuatro puntos) y  $c^*(t)$  es la media de la concentración normalizada de la misma curva. En base a la uniformidad, el tiempo de homogeneización fue estimado como el tiempo en el cual la uniformidad alcanzada fue mayor a 0.95, esto es, los modelos de poro alcanzaron un 95 % de uniformidad.



### 3. Resultados

Las curvas promedio de los cuatro puntos de monitoreo para los casos resueltos son mostrados en la Fig. 4. Se aprecia que el máximo valor de  $c^*$  fue dado por el caso de  $DR= 0.8$ , y alcanzo aproximadamente 5 unidades adimensionales en  $t=0.125$  s. A medida en que el contaminante se dispersa en el poro, este valor se redujo drásticamente a  $c^*=0.6$  en  $t=0.75$  s. Para los otros

modelos, los picos de máxima concentración de  $c^*$  se atenuan y sus decaimientos se retardan a instantes posteriores, dado a la influencia de la DR. Estos cambios en el las curvas de dispersión son consecuencia de las diferencias geométricas en las zonas de expansión contracción, así como de las velocidades y contenidos de fluido de los modelos.

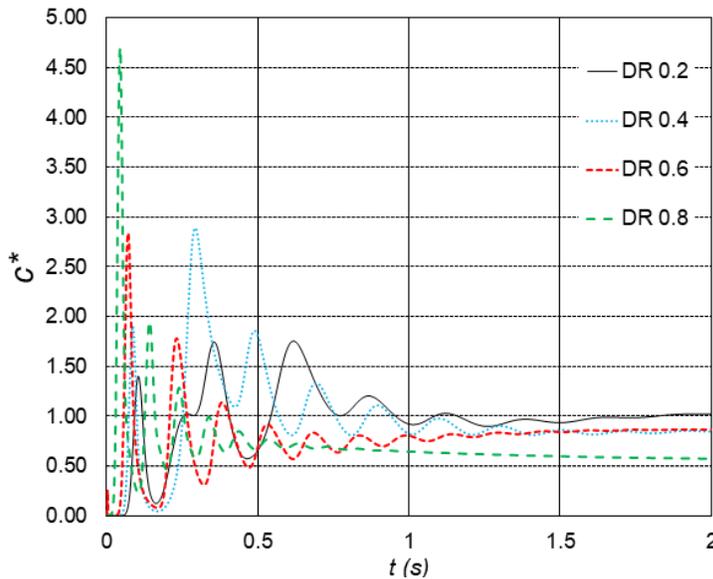


Figura 4. Concentración adimensional promedio obtenida para los diferentes casos resueltos.

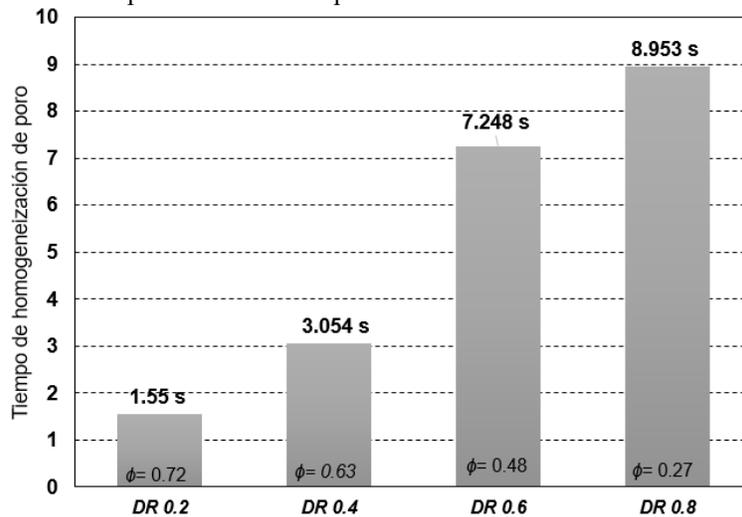


Figura 5. Tiempos de homogeneización.



Los tiempos de homogeneización de poro obtenidos para los casos evaluados son mostrados en la Fig. 5. En ellas se aprecia que los menores tiempos fueron obtenidos por el modelo de poro  $DR=0.2$  el cual tiene una porosidad de  $\phi=0.72$ . Esto es consecuencia de su configuración geométrica, la cual induce la

formación de estelas en las hileras superiores e inferiores de partículas las cuales aumentan la vorticidad y por ende el mezclado. Lo anterior se representa en los círculos sombreados de la Fig. 6.

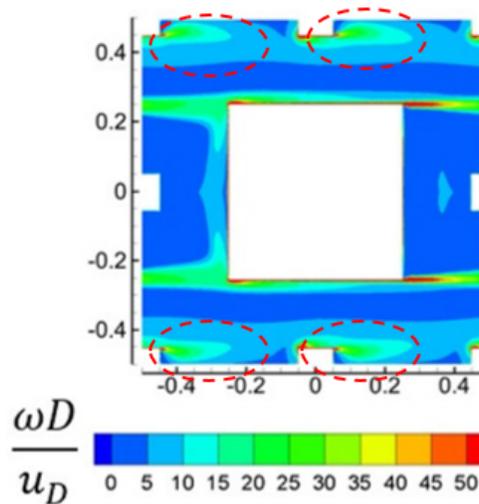


Figura 6. Zonas de recirculación para el modelo  $DR=0.2$ , adaptada de Ref. [14].

A medida que la porosidad aumenta para los casos  $DR=0.4$  y  $DR=0.6$ , las estructuras de recirculación disminuyen y los tiempos de homogeneización aumentan. Para el caso puntual de  $DR=0.8$ , la porosidad es la mínima y el

modelo careció de regiones recirculantes en medio de la partículas, lo cual fue contraproducente en el proceso de dispersión del trazador, ocasionando un retardo en el tiempo de uniformidad (véase Fig. 7).

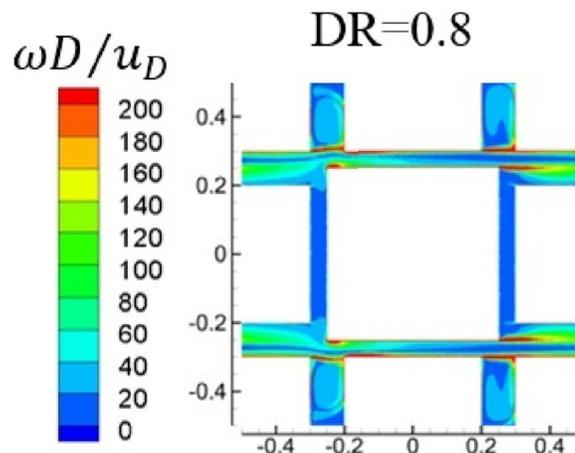


Figura 7. Vorticidades promedio para  $DR=0.8$  y  $\phi=0.72$  [14].



Con la finalidad de explicar el comportamiento integral del mezclado (porqué un modelo de poro mezcla mejor que otro), la Fig. 8 muestra la evolución temporal de la dispersión del trazador obtenida para los modelos representativos  $DR=0.2$  y  $DR=0.8$ . Para el caso de  $DR=0.2$ , la dispersión fue más rápida debido a estructuras de alta recirculación en las corrientes de alta velocidad, siendo esto benéfico para la disminución de tiempo de homogeneización del

poro. Para el caso del  $DR=0.8$ , se puede observar como las altas concentraciones solamente ocurren sobre los canales de flujo superiores e inferiores que delimitan las hileras de los cilindros más pequeños. En las posiciones intermedias entre partículas, no se observó una buena dispersión del trazador debido a la ausencia de estructuras de recirculación con velocidades significativas.

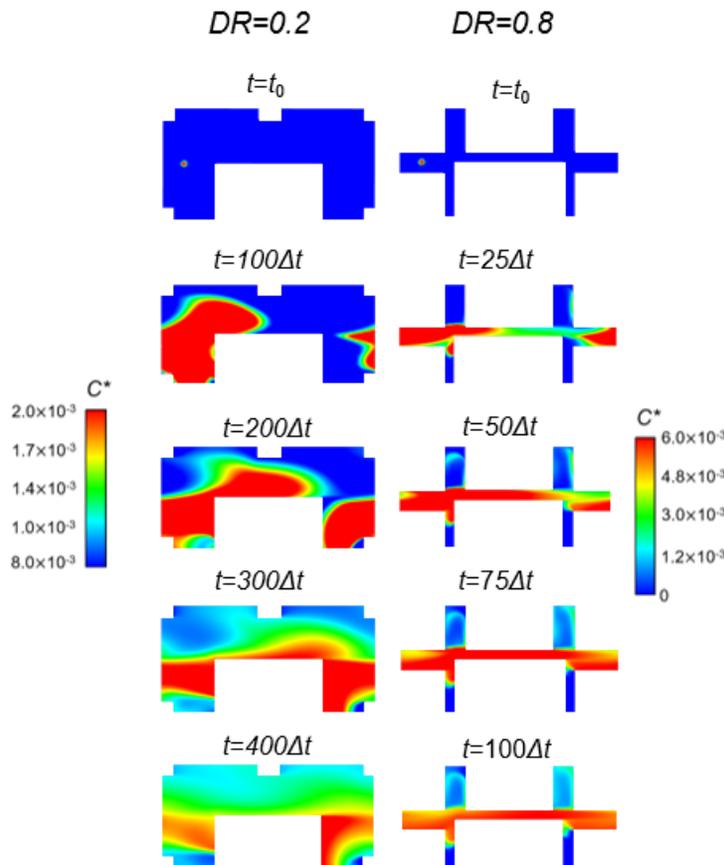


Figura 8. Evolución temporal de la dispersión del trazador para  $DR=0.2$  y  $DR=0.8$ .

#### 4. Conclusiones

Contrario a lo que se hubiera esperado respecto a la velocidad de homogeneización dentro de un poro de menor tamaño, que por consiguiente tiene un menor volumen de fluido, se manifestó la importancia de otros factores que influyen en el proceso de difusión. Aquí la generación de

estructuras de recirculación toma un papel significativo respecto a la dispersión del trazador. En este caso, el modelo de  $DR=0.2$  y  $\phi=0.72$  presentó el menor tiempo de homogeneización.

El estudio de este efecto en medios porosos es importante, dado a que futuros rediseños pueden ser ideados en cuanto a la capacidad de generar



estructuras recirculantes, los cuales asimismo requieran menos cantidad de material sólido para su funcionamiento. En futuros trabajos, se estudiarán modelos simplificados en tres dimensiones, los cuales serán evaluados con técnicas más poderosas como el LES.

## 5. Agradecimientos

El Dr. Alejandro Alonzo García agradece el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del proyecto Ciencia de Frontera 139005.

## 6. Reconocimiento de autoría

**Morales-Arévalo Lucia A.:** *Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis Formal, Escritura de borrador original, Sanjuan Galindo René:* *Supervisión, Metodología, Análisis formal, Revisión y edición de escritura.*  
**Ramos-Delgado Norma Alicia:** *Supervisión, Metodología, Análisis formal, Revisión y edición de escritura.*  
**Morales-Contreras Oscar Adrián:** *Supervisión, Metodología, Análisis formal, Revisión y edición de escritura,*  
**Mendoza-Rosas Ana Teresa:** *Supervisión, Metodología, Análisis formal, Revisión y edición de escritura,*  
**Alejandro Alonzo-García:** *Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis Formal, Escritura de borrador original.*

## Referencias

[1] A. Dybbs and R. V. Edwards, *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. 1984.

[2] J. S. Weitzman, L. C. Samuel, A. E. Craig, R. B. Zeller, and S. G. Monismith, "On the use of refractive - index - matched hydrogel for fluid velocity measurement within and around geometrically complex solid obstructions," *Exp. Fluids*, vol. 55, no. November, pp. 1-12, 2014.  
<https://doi.org/10.1007/s00348-014-1862-x>.

[3] Y. Jin, M. F. Uth, A. V. Kuznetsov, and H. Herwig, "Numerical investigation of the possibility of macroscopic turbulence in porous media: A direct numerical simulation study," *J. Fluid Mech.*, vol. 766, pp. 76-103, 2015.  
<https://doi.org/10.1017/jfm.2015.9>.

[4] A. Rasam, G. Brethouwer, P. Schlatter, Q. Li, and A. V. Johansson, "Effects of modelling, resolution and anisotropy of subgrid-scales on large eddy simulations of channel flow," *J. Turbul.*, vol. 12, no. December, pp. 1-20, 2011.  
<https://doi.org/10.1080/14685248.2010.541920>

[5] C. Hrenya, S. Miller, T. Mallo, and J. Sinclair, "Comparison of low Reynolds number  $k-\epsilon$  turbulence models in predicting heat transfer rates for pipe flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 41, no. 11, pp. 1543-1547, 1998.  
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00208-1).

[6] F. Kuwahara, T. Yamane, and A. Nakayama, "Large eddy simulation of turbulent flow in porous media," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 33, no. 4, pp. 411-418, 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.12.011>.

[7] P. Kundu, V. Kumar, Y. Hoarau, and I. M. Mishra, "Numerical simulation and analysis of fluid flow hydrodynamics through a structured array of circular cylinders forming porous medium," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 23-24, pp. 9848-9871, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.043>.

[8] J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics, A Practical Approach*, Second. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2009.

[9] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, First ed. California: DCW Industries, 1993.



[10] M. H. J. Pedras and M. J. S. de Lemos, "Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 44, no. 6, pp. 1081-1093, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00202-7).

[11] A. Nakayama and F. Kuwahara, "A macroscopic turbulence model for flow in a porous medium," *J. Fluids Eng.*, vol. 121, no. June 1999, pp. 427-433, 1999. <https://doi.org/10.1115/1.2822227>.

[12] A. Nakayama and F. Kuwahara, "A General Macroscopic Turbulence Model for Flows in Packed Beds, Channels, Pipes, and Rod Bundles," *J. Fluids Eng.*, vol. 130, no. 10, p. 101205, 2008. <https://doi.org/10.1115/1.2969461>.

[13] J. Yang, M. Zhou, S. Y. Li, S. S. Bu, and Q. W. Wang, "Three-dimensional numerical analysis of turbulent flow in porous media formed by periodic arrays of cubic, spherical, or ellipsoidal particles," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 136, no. 1, p. 011102, 2014. <https://doi.org/10.1115/1.4025365>.

[14] A. Alonzo-Garcia, A. T. Mendoza-Rosas, M. A. Díaz-Viera, S. A. Martínez-Delgado, and E. Martínez-Mendoza, "Assessment of Low-Re turbulence models and analysis of turbulent flow in porous media consisting of square cylinders with different diameter ratios," *J. Fluids Eng.*, vol. 143, no. 1, p. 18, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4048284>.



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](#)