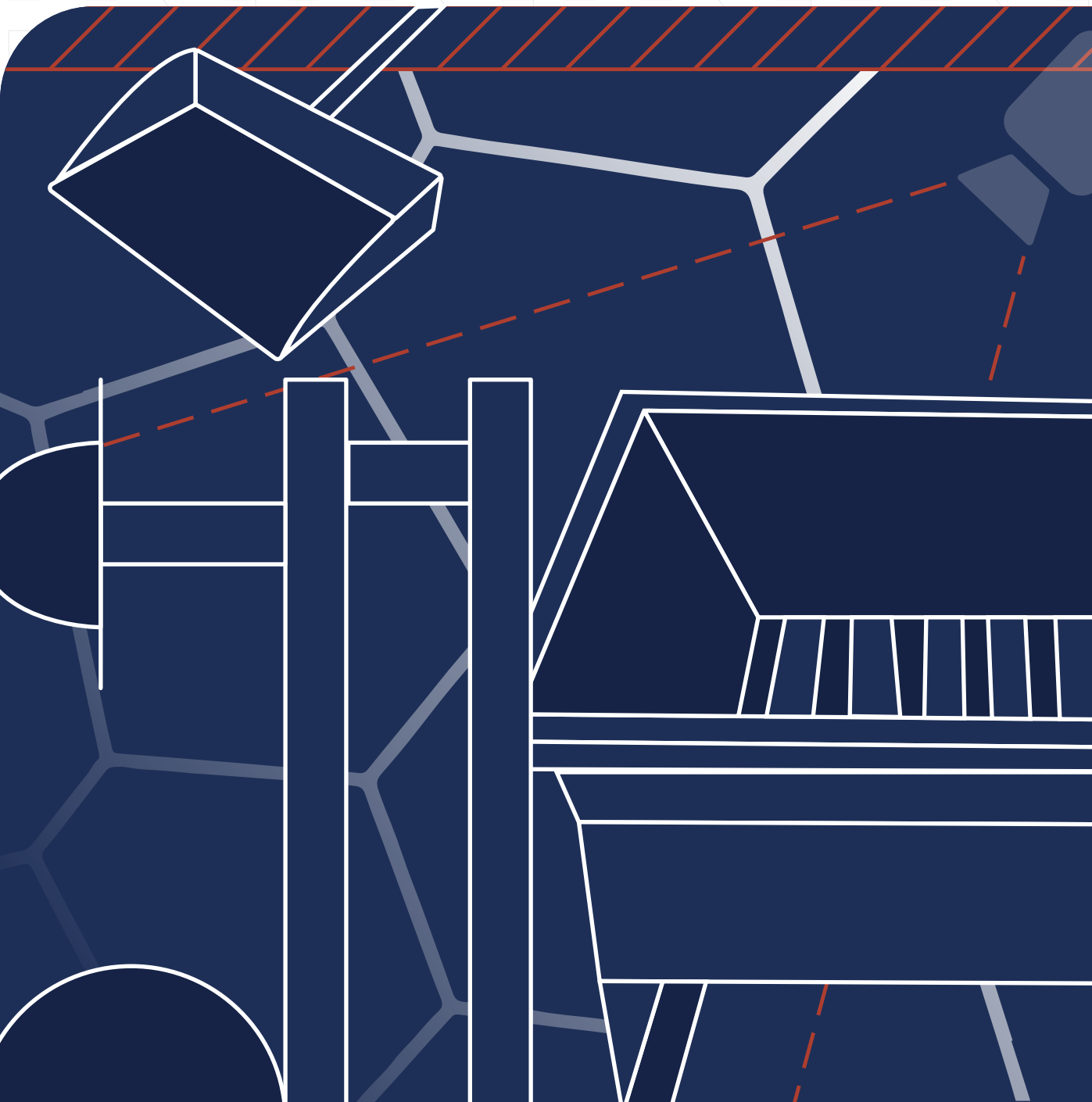




PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

16

ISSN: 2683-3107



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO

ENERO-JUNIO 2026

VOLUMEN 9, NÚMERO 16

DIRECTORIO

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano

RECTORA

Dr. José Guadalupe Gómez Soto

SECRETARIO ACADÉMICO

Dr. Manuel Toledano Ayala

SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y POSGRADO

Mtra. Diana Rodríguez Sánchez

DIRECTORA DEL FONDO EDITORIAL UNIVERSITARIO

Lic. Ivonne Álvarez Aguillón

COORDINADORA DE PUBLICACIONES PERIÓDICAS

Dra. María de la Luz Pérez Rea

DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

JEFE DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Mtro. Cristian Emanuel Tovar Navarro

COORDINADOR DEL DESPACHO DE PUBLICACIONES
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología, Vol. 9, Núm. 16, enero-junio 2026, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro., Tel. (442) 1921200 ext. 6023, <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas>, perspectivasci@uaq.mx. Editor responsable: Ángel Pérez Cruz. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2021-81011485000-102, ISSN: 2683-3107, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: Ángel Pérez Cruz, Cerro de las Campanas, s/n Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, Qro. Fecha de última modificación: 26 de agosto de 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido, siempre y cuando se atribuya la fuente y se proporcione un enlace al original. Esta obra está bajo Licencia Creative Commons: Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Esta revista está actualmente registrada en el Directorio de Latindex.



PERSPECTIVAS DE LA **CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA**

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DIRECTOR

Dr. Ángel Pérez Cruz

Universidad Autónoma de Querétaro, México

EDITOR RESPONSABLE

COMITÉ ASESOR CIENTÍFICO

Dr. Manuel Toledano Ayala

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ÁREA: SISTEMAS EMBEBIDOS

Dra. Marcela Vargas Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ÁREA: BIOSISTEMAS Y BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

Dra. Mónica Ledesma Motolinía

Universidad Autónoma de Puebla, México

ÁREA: FÍSICA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Dra. Angélica Godínez Oviedo

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: MICROBIOLOGÍA E INOCUIDAD ALIMENTARIA

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Universidad Autónoma de Querétaro, México

ÁREA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL

EQUIPO EDITORIAL

Mtro. Cristian Emanuel Tovar Navarro

Universidad Autónoma de Querétaro, México

DISEÑO EDITORIAL Y PORTADA

Mtro. Soid Lazlo Ruiz Ramírez

Universidad Autónoma de Querétaro, México

CORRECCIÓN DE ESTILO



Contenido

Artículos

Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto 6

Flor María de los Ángeles González Porta
Juan Bosco Hernández Zaragoza

Estudio comparativo de temperaturas superficiales de un recinto construido en Querétaro mediante termografía infrarroja y modelación numérica 23

María José Ugalde Fonseca
Iván Fermín Arjona Catzim
Luis Francisco Pérez Moreno
Enrique Rico García

Tendencias en control aplicado a robots móviles mediante visión externa 42

Arturo Iram de la Fuente Sánchez
Gerardo Israel Pérez Soto
Jesús Franco Robles

Modelado de lentes gravitacionales a través de redes neuronales convolucionales 54

Juan Jordi Ancona Flores
Alberto Hernández Almada
Octavio Cornejo Pérez

Structural integrity assessment of concrete slabs using statistical indicators and neural networks 75

Yoselin Garrido Hernández
Martín Valtierra Rodríguez
José Manuel Machorro López
José Trinidad Pérez Quiroz
Juan Pablo Amezcuita Sánchez



Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto

Granulometric comparison and behavior of stone fines
of natural origin and recycled concrete

Flor María de los Ángeles González Porta*
Juan Bosco Hernández Zaragoza

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México.

*angelesgporta@gmail.com

01

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

F. M. A. González Porta y J. B. Hernández Zaragoza, "Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm 16, pp. 6-22, 2026.



Resumen

Esta investigación determina las características de los materiales de construcción reciclados, las cuales pueden variar según el concreto de origen, por lo que cada banco de reciclado debe ser evaluado acorde a las normativas mexicanas vigentes. Los materiales reciclados pueden usarse en construcciones, aunque no en capas estructurales debido a la heterogeneidad en sus distribuciones granulométricas, sino en los estratos inferiores como terracerías. Después de aplicar experimentos de laboratorio, se identificó una elevada concentración de arenas para los reciclados de concreto (60.22 %) frente a los naturales (30.95 %). Se comparó la granulometría, textura y comportamiento de los finos, destacando que

estos fortalecen la resistencia del concreto al rellenar fisuras. La investigación se centra en la evaluación de la factibilidad de uso de materiales reciclados por medio de parámetros establecidos en las normativas a manera de alternativa sustentable para la construcción de carreteras, comparando los materiales de origen natural y procesado, y se determina que es la combinación entre ambos la que mejora el rendimiento de las mezclas. En Querétaro, existe solamente un banco de reciclados de construcción normados, y se recomienda su utilización combinada para mejorar la distribución granulométrica y las propiedades mecánicas de las mezclas.

Palabras clave: agregados reciclados, construcción de carreteras, economía circular, emisiones de CO_2e , granulometría, límites de Atterberg.

Abstract

This research evaluates the characteristics of recycled materials, which vary depending on the concrete of origin, thus each recycling bank must be evaluated according to current Mexican regulations. Recycled materials can be used in construction, although not in structural layers due to the variability in their granulometric distribution, but in lower strata as is the case in dirt roads. Laboratory tests were carried out, identifying a high concentration of sands in the recycled concrete (60.22%) in comparison to the natural ones (30.95%). The granulometry, texture and behavior of the fines were evaluated, highlighting that these im-

prove the concrete resistance by means of filling cracks. The research focuses on the evaluation of the feasibility of using recycled materials through parameters established in the regulations as a sustainable alternative in road construction, comparing materials of natural and processed origin, concluding that the combination of both improves performance. of the mixtures. In Querétaro, there is only one regulated construction recycling bank, and its combined use is recommended to improve the particle size distribution and mechanical properties of the mixture..

Keywords: recycled aggregates, road construction, circular economy, CO_2e emissions, particle size distribution, Atterberg limits.



Introducción

De acuerdo con la SEMARNAT, la economía circular es un modelo de desarrollo que busca mantener el valor de los productos, materiales y recursos en las cadenas de producción durante el mayor tiempo posible mediante estrategias como el ecodiseño, el reciclaje, la reutilización y la valorización [1]. No obstante, a pesar de la creciente demanda y relevancia del proceso de reciclaje, en México, la proporción de materiales reciclados alcanzó apenas el 9.63 % del volumen total de residuos generados en 2012 [2].

El CO_{2e} de los gases de efecto invernadero (como metano, óxido nitroso y varios gases fluorados) refiere a la concentración equivalente de CO_2 que tendría el mismo efecto de forzamiento radiativo durante un periodo de 100 años. Al respecto, la media de CO_{2e} por tonelada de asfalto generada es de 0.055 kg CO_{2e} /kg mientras que el asfalto reciclado alcanza los 0.066 kg CO_{2e} /kg, es decir, un 20 % más [3]. Por otro lado, Jiménez [4] reporta una densidad de CO_{2e} /kg para agregados naturales de 0.00132 m³ piedra/kg y de 0.002 m³ fragmentos/kg para agregados de concreto reciclados. Sin embargo, al priorizar la cuantificación de las emisiones de carbono sobre el análisis detallado del proceso de reciclaje en sí, se ha relegado la importancia del material reciclado en obras de construcción.

El objetivo principal de la presente es comparar las propiedades granulométricas y el comportamiento de los finos en materiales pétreos de origen natural y reciclado, con el fin de evaluar su viabilidad técnica para su uso en la construcción de carreteras, particularmente en las capas de menor exigencia estructural.

Marco teórico

La Unión Europea [5] informó sobre la generación de 2317 millones de toneladas de residuos en 2018, de las cuales el 36 % (aproximadamente 834 millones de toneladas) provino de la industria de la construcción. Este sector genera repercusiones medioambientales insoslayables: desviaciones de los cauces superficiales, contaminación de aguas subterráneas, cambio de uso de suelos, polución atmosférica, pérdida de vegetación, impactos visuales, reducción de terreno cultivable. En este contexto, Hansen reporta que, como estrategia de desarrollo sostenible, el polvo de piedras y agregados de concreto puede reciclarse con resultados satisfactorios en durabilidad y resistencia, tanto al estrés mecánico como al fuego [6] en la producción de concretos verdes [7]. Otra ventaja es el ahorro de recursos no renovables relacionados con operaciones secundarias en la extracción de materia prima para



la producción de concreto (por ejemplo, el combustible para el transporte del material y los sitios de explotación directa del terreno).

Fergus [8] aplicó a un agregado de concreto reciclado 300 ciclos en una cámara de congelamiento y deshielo, tras los cuales se mantenían sus propiedades de durabilidad y buena calidad general. Aunque se trata de un estudio temprano, abre la posibilidad de que el uso de residuos en el concreto pueda beneficiar tanto a la industria de la construcción, al mejorar la durabilidad y resistencia, como a la gestión de residuos, al contribuir a estrategias de cero residuos y economía circular [9], [10]. A su vez, los trabajos de Tejas y Pasla evaluaron las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con pétreos reciclados, y estimaron que el módulo elástico puede incluso superar el de un concreto convencional [11].

En cuanto a la durabilidad, se ha reportado que, aunque los agregados reciclados presentan un mayor desgaste en la prueba de Los Ángeles frente a los naturales, exhiben mejor resistencia al intemperismo acelerado. Esta capacidad se atribuye a su origen, principalmente de concreto premezclado diseñado para resistir ambientes agresivos. El desempeño similar de ambos materiales en pruebas micro-Deval sugiere que los agregados reciclados podrían ser aptos para aplicaciones en capas no estructurales donde la abrasión es moderada [12].

La granulometría de los agregados influye directamente en la densidad, resistencia, permeabilidad y trabajabilidad del concreto o mezcla. Un material con predominancia de partículas gruesas (como la grava) suele ofrecer mayor resistencia mecánica, menor área superficial específica, y por tanto, menor demanda de agua y cemento, haciéndolo ideal para capas estructurales como bases o subbases de pavimentos. Por otro lado, un material con alta proporción de partículas finas (arena o limos) puede mejorar la trabajabilidad y facilitar el acabado superficial, pero si no está bien graduado, puede provocar exudación, fisuración por contracción, y pérdidas de resistencia. Además, un exceso de finos puede reducir la permeabilidad de los agregados y afectar su comportamiento frente a la precipitación o la intemperie, limitando su aplicación a las capas inferiores no estructurales [13]. Por tanto, una de las desventajas de los reciclados es que tanto el agregado fino como el grueso presentan una granularidad tan irregular que no necesariamente les permite componer mezclas lo suficientemente densas, compactas o manejables.

Por último, los límites de Atterberg [14] proporcionan información sobre las propiedades de deformación de la fracción de materiales que pasa a través de la malla núm. 40 (0.425 mm), el límite técnico entre fracción gruesa y fina en suelos según la mayoría de las normativas geotécnicas. Los resultados de estas



pruebas se emplean principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. El proceso de prueba implica la determinación del límite líquido (LP), que es el contenido de agua en el cual un suelo plástico exhibe una resistencia al corte de 2.45 kPa ($\sim 25 \text{ g/cm}^2$), marcando la transición entre los estados semilíquido y plástico. Además, se evalúa el límite plástico, que es el contenido de agua para el cual un cilindro de suelo se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm, marcando la transición entre estados plásticos y semi-sólidos. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

Metodología

A fin de llevar a cabo las pruebas empíricas, en primer lugar, se recopilaron muestras de agregados pétreos de una cantera natural y de un proveedor industrial de agregados reciclados. En segunda instancia, se aplicaron las normas SCT-MMP-1-03-03 [15], referentes a la preparación y condiciones de evaluación de agregados pétreos. Como siguiente paso se realizó el análisis granulométrico por medio de un tamizado gradual sistemático de cada tipo de muestra bajo la SCT-MMP-1-06-03 [16]. La siguiente etapa consistió en la determinación de los límites de consistencia de los materiales por medio del método del cono de penetración de conformidad con la norma británica BS 1377:2-1990 [17]. Por último, una vez obtenidos los registros de granulometría, límite líquido e índice plástico, se procedió a una comparación entre los especímenes para determinar la adecuación de los agregados reciclados como materiales de construcción en carreteras en función de sus parámetros físicos.

Equipo

Para el cuarteo del material se utilizaron equipos de conformidad con la normativa M-MMP-1-03-03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Figura 1):

- Cuarteador metálico
- Cuchara
- Tres bandejas
- Charola rectangular para depositar el material descartado



FIGURA 1.

Equipo para cuarteo: cuarteador metálico, cuchara, bandejas, charola rectangular para depositar el material descartado. Fuente: elaboración propia.



De acuerdo con la normativa M-MMP-1-06-03, para la granulometría se emplearon tamices de las siguientes medidas (Figura 2):

- 3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4" y núm. 4 para las gravas
- Núm. 10, núm. 20, núm. 40, núm. 60, núm. 100 y núm. 200 para las arenas y finos

Adicionalmente se ocupó un cucharón para el vertido del material en las mallas, así como una charola como fondo y la tapa superior para evitar pérdida de finos. El uso de diferentes mallas obedece a la clasificación granulométrica estándar de los materiales pétreos, donde los tamaños de partícula determinan si el material se considera grava, arena o fino. De acuerdo con la normativa y la clasificación del sistema SUCS, las partículas mayores a 4.75 mm se consideran gravas, mientras que aquellas entre 0.075 mm y 4.75 mm se clasifican como arenas. Las que son menores a 0.075 mm se identifican como finos.

FIGURA 2.

Equipo para granulometría. Conjunto de mallas empleadas para el proceso de tamizado sucesivo. Fuente: elaboración propia.



La técnica utilizada para la obtención de los límites de Atterberg o límites de consistencia fue el método de penetrómetro cónico. Los límites de Atterberg



se utilizan para caracterizar el comportamiento plástico de los suelos finos, determinando su capacidad de deformarse sin romperse. Específicamente, permiten identificar el contenido de humedad en el cual un suelo cambia de estado sólido a semisólido (límite plástico), y de semilíquido a plástico (límite líquido). Estos valores son fundamentales para clasificar los suelos según el sistema SUCS y para prever su desempeño en campo, ya que influyen directamente en la trabajabilidad, compactabilidad y estabilidad del material en terracerías o capas estructurales. En la Figura 3 se aprecia la copa de Casagrande y el penetrómetro respectivamente. Adicionalmente, se ocupó un mortero de porcelana con pistilo para la homogenización y mezclado de los finos y agua previo a su uso en las pruebas.

FIGURA 3.
Equipo de límites de consistencia. Cono de penetración normalizado con su respectivo penetrómetro (izquierda) y copa de Casagrande (derecha).
Fuente: elaboración propia.



Recopilación de muestras

Los agregados pétreos naturales empleados en el proyecto fueron extraídos de una cantera ubicada en la cañada del municipio de El Marqués, Querétaro. Esta fuente suministra materiales pétreos de calidad estandarizada al corporativo Abraham González, una empresa mexicana del sector de la construcción. En total se extrajo una muestra.

Los reciclados fueron provistos por Reurba, compañía que posee la única certificación en el registro de prestadores de servicios especializados en residuos de construcción en el estado de Querétaro. Se extrajeron tres muestras, puesto que los reciclados suelen presentar características muy variables, incluso si vienen del mismo proveedor.



Cuarteo del material (M-MMP-1-03-03)

Se llevó a cabo un cuarteo (descarte aleatorio de la mitad de cada muestra), previo secado y desagregación de ambos materiales, utilizando un cuarteador metálico bajo las especificaciones establecidas en la normativa M-MMP-1-03-03 (Figura 4):

- Número igual de aberturas de los ductos separadores en ambas direcciones de vertido
- No menos de 8 para materiales gruesos, 12 para finos
- Ancho mínimo de aberturas: 1.5 veces el tamaño máximo de las partículas si la muestra es gruesa; 12.5 a 20 mm si la muestra pasa la malla de 3/8"
- Tolva de ancho igual o menor que las aberturas en general y longitud igual al cuarteador
- Dos charolas laterales para recibir el material

FIGURA 4.
Cuarteador con material pétreo. Se observan las ranuras que dividen por la mitad cada muestra y las depositan en la bandeja inferior.
Fuente: elaboración propia.



El proceso se efectuó cuatro veces, una por cada muestra recopilada (3 naturales y 1 reciclada).

Análisis granulométrico (M-MMP-1-06-03)

Este ensayo tiene la finalidad de identificar la distribución de tamaños de las partículas que conforman los materiales pétreos empleados y consiste básicamente en el cribado secuencial de las muestras de agregados; los detalles pueden consultarse en [16]. Los resultados son esenciales para comprender la distribución de tamaños de las partículas en los materiales y desempeñan un papel crucial en el proceso de diseño y construcción. Como cabe suponer, se realizaron en total cuatro análisis granulométricos: tres a los agregados reciclados y uno a los agregados naturales.



Determinación de límites de consistencia

Se cuantificaron los respectivos índices plásticos (IP) de las muestras, en función de los límites de Atterberg. Estos parámetros suelen tratarse en términos de los límites líquido (LL) y plástico (LP), para los cuales existen pruebas específicas; sin embargo, debido a la baja cohesión de las muestras recopiladas en esta investigación, fue necesario recurrir a datos de LP reportados en literatura previa. El LL se graduó a partir del test del cono de penetración, normado por la normativa británica BS 1377:2-1990, que permite obtener resultados de materiales limosos y/o arenosos con bajo índice de plasticidad. Consiste en colocar un cono normalizado de 30° y 80 g (Figura 5) sobre una muestra de suelo, y dejar que penetre el material durante un lapso de 5 segundos; la profundidad que alcanza está estrechamente correlacionada con el contenido de humedad. Entonces, se considera que el LL se encuentra al porcentaje de humedad en que el cono penetra una longitud de 20 mm; en cuanto al LP, Barreto y Gámez [18] indican que el punto de transición entre el estado plástico y semisólido en materiales con bajo índice de plasticidad se encuentra a una penetración de 2.2 mm.

El índice de plasticidad se calculó como una función de ambos límites por medio de la diferencia entre ellos, multiplicada por el factor 0.73, que compensa la divergencia entre las pruebas realizadas con el cono de penetración contra los métodos convencionales: de copa de Casagrande para el LL y el método de desmoronamiento para el LP.

$$IP = 0.73 (LL - LP) \quad (1)$$



FIGURA 5.
Cono de penetración
colocado sobre la
muestra de material
para determinar el
límite de consistencia.
Fuente: elaboración
propia.

Resultados

Granulometría

El material natural presenta un tamaño nominal de partícula de 2 mm, lo que correspondería con una arena; a pesar de ello, la presencia de grava es mayor debido a que la diferencia con la malla de 1” y la malla de ½” es minúscula. El material contiene una cantidad menor de arenas de las mallas número 40 a la 200, debido a que el proveedor las reserva para mezclas con especificaciones únicas de uso en asfaltos. El resumen de todas las mallas se encuentra en la Tabla 1, y los colores representan el nivel de retención de cada malla en orden descendente como sigue: rojo, naranja, amarillo, verde claro y verde oscuro.

TABLA 1.
Granulometría de pétreo natural. Fuente: elaboración propia.

MALLA (RETENIDO)	MM	CONTENIDO DEL COSTAL 1 EN GRAMOS	%
1.5”	37.5	526.7	6.60
1”	25	1264.9	15.84
0.75”	19	731.7	9.16
0.5”	12.5	1257.7	15.75
0.375”	9.5	301.1	3.77
0.25”	6.3	932.8	11.68
núm. 4	4.75	416.5	5.22
núm. 10	2	1286.6	16.11
núm. 20	0.85	634.8	7.95
núm. 40	0.425	299.8	3.75
núm. 60	0.25	101.2	1.27
núm. 100	0.15	75.2	0.94
núm. 200	0.075	75.2	0.94
Pasa 200		82.1	1.03
Total		7986.3	100.00

El material pétreo reciclado muestra alta variabilidad en las granulometrías, pero predominan las arenas en los tres grupos (pese a que una de las muestras se compuso mayoritariamente de grava a propósito); en la Tabla 2 se encuentra el resumen de todas las mallas, con el código de color especificado antes. En los tres costales el tamaño nominal fue de 2 mm, con alta incidencia de



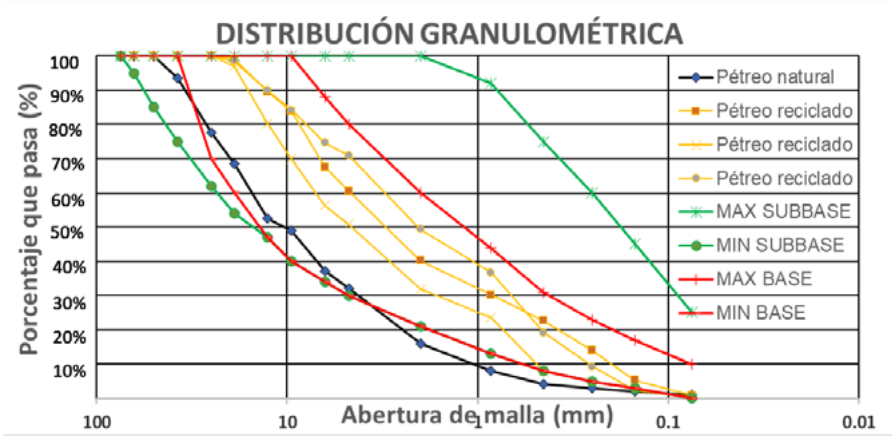
grava de ½” en el costal 2 y arenas de 0.425 mm en el costal 3. Esta diferencia puede atribuirse a la naturaleza heterogénea del concreto reciclado, ya que proviene de residuos de construcción con composición, origen y procesamiento muy variables. A diferencia de los agregados naturales, que provienen de fuentes controladas, los reciclados pueden contener fragmentos de diferentes tipos de concreto (estructural, pavimento, banquetas, etc.) con distintos tamaños y grados de trituración. Además, durante la recolección, es posible que no se haya realizado un cribado uniforme en el banco Reurba, lo que provoca que en una misma zona de extracción coexistan partículas más finas y más gruesas.

TABLA 2.
Granulometría de los pétreos reciclados. Fuente: elaboración propia.

MALLA (RETENIDO)	mm	COSTAL 1 (G)	COSTAL 2 (G)	COSTAL 3 (G)
0.75"	19	25.6	139	64.7
0.5"	12.5	252.3	792.3	354.2
0.375"	9.5	147.7	484	233.7
0.25"	6.3	427.3	632.9	388.7
núm. 4	4.75	183	258.2	155.1
núm. 10	2	533.1	881.8	882
núm. 20	0.85	261.7	390.3	516.8
núm. 40	0.425	200.4	741.5	726
núm. 60	0.25	226.5	139.4	402.6
núm. 100	0.15	226	94.7	283.2
núm. 200	0.075	118.6	106.6	91.6
Pasa 200		21.4	24.3	6.5
Total		2623.6	4685	4105.1

Las curvas granulométricas, tanto de pétreos naturales como de reciclados de concreto, se muestran a continuación en la Figura 6. Se muestran también las gráficas correspondientes a los valores máximos y mínimos permitidos para los materiales empleados en la construcción de bases y subbases carreteras [19].

FIGURA 6.
Curvas de granulometría de las muestras. Fuente: elaboración propia.





La clasificación de acuerdo con el contenido de gravas, arenas y finos se realiza con base en la distribución del contenido y los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c). El cálculo del C_u se da por medio de:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2)$$

Y el C_c :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad (3)$$

Donde:

D_{10} Tamiz por el que pasan el 10 % de partículas más pequeñas

D_{30} Tamiz por el que pasan el 30 % de partículas más pequeñas

D_{60} Tamiz por el que pasan el 60 % de partículas más pequeñas

Adicionalmente, para realizar el cálculo de los diámetros efectivos es necesaria una interpolación con la Ecuación 4:

$$D_x = D_i \cdot \left(\frac{x}{x_i} \right)^{\left(\frac{\log\left(\frac{D_s}{D_i}\right)}{\log\left(\frac{x_s}{x_i}\right)} \right)} \quad (4)$$

Donde:

D_i Diámetro conocido anterior al diámetro buscado

D_s Diámetro conocido posterior al diámetro buscado

X Porcentaje asociado al diámetro buscado

X_i Porcentaje asociado al diámetro anterior al diámetro buscado

X_s Porcentaje asociado al diámetro posterior al diámetro buscado

Una vez sustituidos en la Ecuación (4) los valores registrados, se tiene:

$$D_{10} = 1.1491 \text{ mm}$$

$$D_{30} = 4.4101 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 15.6378 \text{ mm}$$

Con estos diámetros efectivos se tienen los siguientes coeficientes de uniformidad y curvatura:

$$C_u = 13.6087$$

$$C_c = 131.0823$$



Con los datos anteriores, se puede concluir de los agregados naturales que:

- Contienen un 68.01 % de gravas.
- Las arenas deben ser nombradas en su clasificación, puesto que componen el 20 % o más del agregado.
- Los finos no son decisivos, pues representan un 1.03 %.
- La clasificación SUCS corresponde a una *grava bien graduada con arena*.

Para los agregados reciclados se tienen los datos resumidos en la Tabla 3:

TABLA 3.

Coefficientes de uniformidad y curvatura de las tres muestras de agregados reciclados, determinados a partir de sus respectivas distribuciones granulométricas. Fuente: elaboración propia.

COSTAL	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c
1	0.204141593	0.837657186	4.680153817	22.92601792	0.734414107
2	0.48432232	1.730988983	7.217009006	14.90125215	0.857229043
3	0.262696846	0.687042355	3.36053288	12.79243713	0.534692407

Con los datos anteriores, se puede concluir de los agregados reciclados que:

- Predomina el contenido de arenas con 59.7 % (costal 1), 50.25 % (costal 2) y 70.7 % (costal 3).
- Las gravas deben ser nombradas en su clasificación, puesto que componen el 20 % o más de los agregados.
- Los finos no son decisivos al tener solo un 0.82 % (costal 1), 0.52 % (costal 2) y 0.16 % (costal 3) de ellos de manera natural; sin embargo, al ser sometidos al desgaste estos materiales tienden a producir un alto contenido de finos, por lo que es importante su evaluación.
- Los agregados reciclados tienen una clasificación SUCS de *arenas mal graduadas con grava* (SP).

Límites de consistencia

Respecto a los resultados de la prueba con el cono de penetración, en la Tabla 4 se observan las humedades a la par de su penetración para los finos de los agregados; un análisis gráfico se muestra en las Figuras 7 y 8, donde se observan las intersecciones del LL y el LP.



TABLA 4.
Datos del cono de penetración: material natural y material reciclado. Se muestra el contenido de humedad correspondiente a cada grado de penetración. Fuente: elaboración propia.

MATERIAL NATURAL		MATERIAL RECICLADO	
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	PENETRACIÓN DEL CONO (mm)
26.7	86	36.9	94
31.1	155	41.7	116.5
32.7	201.5	43.6	201
31.8	224.5	45.2	224.5
36.7	273	48.1	345

FIGURA 7.
Línea de tendencia del material natural.
Fuente: elaboración propia.

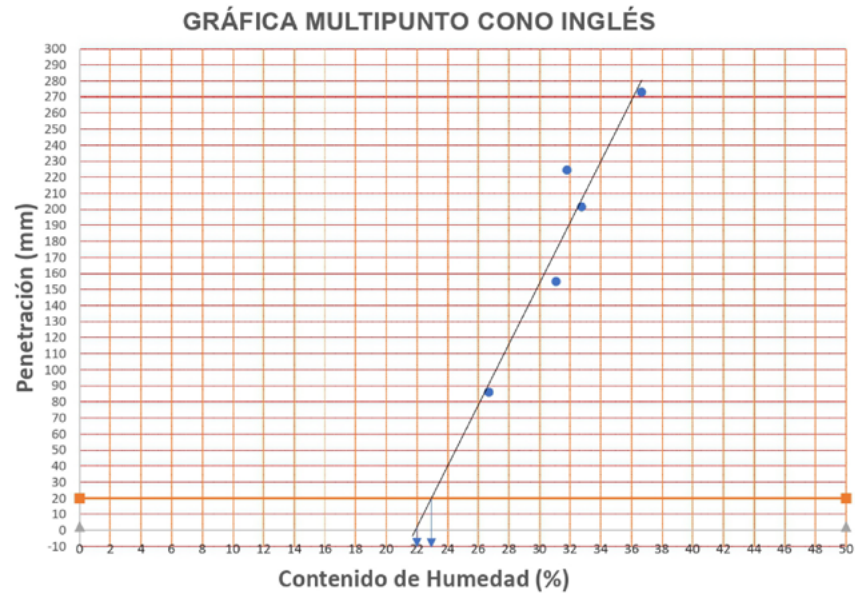
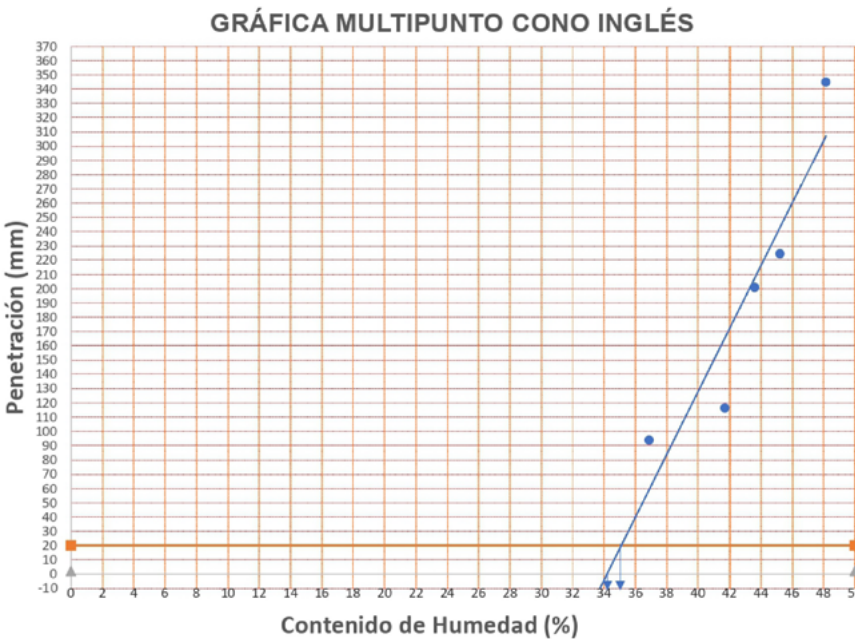


FIGURA 8.
Línea de tendencia del material reciclado.
Fuente: elaboración propia.





En las gráficas mostradas puede apreciarse que el límite líquido de los materiales naturales (la intersección de la recta de regresión lineal con la profundidad de penetración de 20 mm) es de 23 %, mientras que el límite plástico (la intersección de la recta de regresión lineal con la profundidad de penetración de 2.2 mm) es de 22 %. Por tanto, el índice plástico de los finos naturales está dado por:

$$IP = 0.73(23 - 20) = 2.19$$

En cuanto a los materiales reciclados, una muestra compuesta por una porción aleatoria de cada costal dio como resultado un límite líquido de 35 %, mientras que el límite plástico fue de 34.4 %. Para los finos reciclados esto daría un valor de:

$$IP = 0.73(35 - 20) = 10.95$$

De acuerdo con la clasificación SUCS los finos del material natural corresponden a un *limo inorgánico de baja compresibilidad*, mientras que los finos del material reciclado serían clasificados como un *limo inorgánico de mediana compresibilidad* y/o *limo orgánico*.

Conclusión

Los estudios revelan que los materiales reciclados tienen un mayor contenido de arena (60.22 %) en comparación con los naturales (30.95 %), lo que genera una variabilidad en el tamaño de partículas que dificulta su uso en capas estructurales. Los agregados naturales presentan una mejor graduación, con un C_u de 13.61 y un C_c de 131.08, clasificándolos como *gravas bien graduadas con arena*, mientras que los reciclados tienen mayor variabilidad, con un C_u entre 12.79 y 22.93 y un C_c que oscila entre 0.53 y 0.86, clasificándose como *arenas mal graduadas*. Los límites de Atterberg muestran baja plasticidad en ambos tipos de agregados, aunque los reciclados presentan un límite líquido más alto (35 %) e índice de plasticidad mayor (10.95 %) que los naturales. Además, los agregados reciclados generan un 20 % más de emisiones de CO_2 (0.066 kg CO_2 /kg) que los naturales (0.055 kg CO_2 /kg), lo que, sumado a su mayor costo y menor consistencia granulométrica, limita su uso en capas superiores.

No se recomienda el uso en sustitución total de agregado natural por agregado reciclado, ya que sus características (con excepción de su buena resistencia al intemperismo, como se demostró en estudios anteriores) suelen ser inferiores a las de los agregados naturales. Esto no implica que sean inadecuados, sino que actualmente no cumplen con los parámetros normativos exigidos para su



uso en capas estructurales. Esta limitación impide que los agregados reciclados contribuyan plenamente a los objetivos de la economía circular, pues para que un material abone de forma efectiva a este modelo, debe ser técnica y normativamente viable como sustituto funcional, lo cual aún requiere más investigación, clasificación rigurosa y normativas estandarizadas que permitan su aprovechamiento integral.

Los agregados pétreos reciclados presentan ventajas importantes, como una alta resistencia a las sales y al intemperismo, así como una buena trabajabilidad de sus finos, los cuales, según los límites de plasticidad, se comportan como limos. Esta característica los hace útiles en aplicaciones donde se requiere cierta manejabilidad, aunque su baja cohesión puede ser una limitación. Sin embargo, también presentan desventajas relevantes. Entre ellas se encuentra su alta variabilidad granulométrica, incluso dentro de un mismo banco de materiales, lo que dificulta garantizar un comportamiento uniforme. A pesar de solicitar muestras representativas de grava, en las pruebas realizadas se observó una predominancia de arenas. Esta falta de consistencia, sumada a un mayor costo de producción y a una generación ligeramente superior de emisiones de CO_{2e} en comparación con los materiales naturales, limita su aplicación en capas estructurales superiores, como carpetas asfálticas o losas de rodamiento, donde se requiere durabilidad y control granulométrico preciso.

Por estas razones, se considera que el uso más viable y realista de los agregados reciclados es en capas inferiores, como terracerías, subrasantes, subbases y bases, donde las exigencias estructurales son menores y se pueden tolerar algunas variaciones sin comprometer la seguridad o durabilidad de la vía. Se recomienda su utilización en combinación con materiales naturales en proporciones menores al 50 %, previa evaluación de sus propiedades. Esta estrategia no solo permite aprovechar los residuos de la construcción, sino que también promueve una gestión más sustentable al reducir el consumo de recursos naturales no renovables. Además, se subraya la necesidad imperante de desarrollar pruebas de desempeño en campo que habiliten la validación empírica del comportamiento bajo condiciones reales.

Agradecimientos

Un agradecimiento al laboratorio de suelos de la UAQ y a mi esposo por siempre apoyarme. Además, se agradece el acceso a los bancos de materiales y la disposición de los propietarios para suministrarlos.



Referencias

- [1] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). "Gobierno de México expide la Ley General de Economía Circular enfocada en impulsar la conservación del medio ambiente del país". Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/gobierno-de-mexico-expide-la-ley-general-de-economia-circular-enfocada-en-impulsar-la-conservacion-del-medio-ambiente-del-pais?idiom=es>
- [2] V. J. Gutiérrez Avedoy, I. F. Ramírez Hernández, G. Encarnación Aguilar, y A. Medina Arévalo, *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2012*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>
- [3] Comité Técnico D.2 Pavimentos, *Reducción de la huella de carbono del ciclo de vida de los pavimentos*. Organización de las Naciones Unidas: PIARC, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/31426-es-Reducción%20de%20la%20huella%20de%20carbono%20del%20ciclo%20de%20vida%20de%20los%20pavimentos%20-%20Informe%20Técnico>
- [4] L. F. Jiménez, J. A. Domínguez, y R. E. Vega-Azamar, "Carbon Footprint of Recycled Aggregate Concrete", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, núm. 1, Art. 7949741, 2018, DOI: [10.1155/2018/7949741](https://doi.org/10.1155/2018/7949741)
- [5] Eurostat, *Waste Statistics*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.sipotra.it/wp-content/uploads/2020/11/Waste-statistics.pdf>
- [6] T. C. Hansen, "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985", *Materials and Structures*, vol. 19, pp. 201-246, 1986, DOI: [10.1007/bf02472036](https://doi.org/10.1007/bf02472036)
- [7] H. R. Sobuz, M. H. Khan, R. Islam, K. I. Kabbo, A. Alzifawi, M. Jameel, y M. H. Khan, "Combined influence of crushed brick powder and recycled concrete aggregate on the mechanical, durability and microstructural properties of eco-concrete: An experimental and machine learning-based evaluation", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, pp. 8757-8776, 2025, DOI: [10.1016/j.jmrt.2025.05.118](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.118)
- [8] J. S. Fergus, "Laboratory investigation and mix proportions for utilizing recycled Portland cement concrete as aggregate", en *Proceedings of the National Seminar on PCC Pavements Recycling and Rehabilitation*, Washington, DC, EUA, Dic. 1981, Rep. FHWA-TS-82-208, pp. 144-160.
- [9] S. Jadon y S. Kumar, "Stone dust and recycled concrete aggregates in concrete construction: An efficient way of sustainable development", *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.04.221](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.221)
- [10] S. Vilakazi, E. Onyari, O. Nkwonta, y J. K. Bwapwa, "Reuse of domestic sewage sludge to achieve a zero waste strategy & improve concrete strength & durability - A review", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 43, pp. 122-127, 2023, DOI: [10.1016/j.sajce.2022.10.012](https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.10.012)
- [11] S. Tejas y D. Pasla, "Assessment of mechanical and durability properties of composite cement-based recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 387, art. 131620, 2023, DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131620](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131620)
- [12] R. Alvarado Uribe *et al.*, "Comparativa del desgaste de materiales pétreos de origen natural y materiales pétreos reciclados", *Coloquio POSGRADO FI UAQ*, 2023, no publicado.
- [13] R. A. Khan, J. N. Akhtar, R. A. Khan, y M. N. Akhtar, "Experimental study on fine-crushed stone dust a solid waste as a partial replacement of cement", *Materials Today: Proceedings*, 2023, DOI: [10.1016/j.matpr.2023.03.222](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.222)
- [14] *Límites de Consistencia*, M-MMP-1-07/07, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>
- [15] *Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras*, M-MMP-1-03/03, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-03-03.pdf>
- [16] *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*, M-MMP-1-06/03, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/M-MMP-1-06-03.pdf>
- [17] *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Part 2: Classification tests*, BS 1377-2:1990, British Standards Institution.
- [18] J. Leal-Barreto y A. J. Gámez Morales, "Determinación del límite líquido y plástico para un suelo caolín amarillo usando el penetrómetro de cono de caída con diferentes modelos de cono", tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5e221067-fe95-4ffe-a9e1-909b96b61823/content>
- [19] *Materiales para Subbases y Bases*, N-CMT-4-02-001/11, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/storage/normativa/N-CMT-4-02-001-11.pdf>



Estudio comparativo de temperaturas superficiales de un recinto construido en Querétaro mediante termografía infrarroja y modelación numérica

Comparative study of interior surface temperatures in a built space in Querétaro via infrared thermography and CFD modeling

María José Ugalde Fonseca
Iván Fermín Arjona Catzim
Luis Francisco Pérez Moreno
Enrique Rico García*

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México.

*ricog@uaq.mx

02

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

M. J. Ugalde Fonseca, I. F. Arjona Catzim, L. F. Pérez Moreno y E. Rico García, "Estudio comparativo de temperaturas superficiales de un recinto construido en Querétaro mediante termografía infrarroja y modelación numérica", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm. 16, pp-23-41, 2026.



Resumen

Este estudio analiza el comportamiento térmico interior de un recinto construido en Huimilpan, Querétaro, por medio del cotejo de mediciones experimentales hechas con cámara termográfica infrarroja y simulaciones numéricas basadas en dinámica de fluidos computacional (CFD). El recinto, de 16.38 m², está conformado por muros de bloques de concreto, cubierta de lámina galvanizada y elementos estructurales de concreto colado. Las mediciones se realizaron el 7 de junio de 2025 a las 14:00 h, tomando temperaturas superficiales en los muros internos y condiciones ambientales externas. Después se construyó un dominio tridimensional discretizado con malla poly-hexcore y se aplicaron condiciones de frontera con base en registros *in situ*, incluyendo radiación solar y ventilación cruzada. Los re-

sultados muestran una elevada concordancia entre valores simulados y experimentales, con coeficientes de determinación superiores a 0.93 en los cuatro muros evaluados. Se identificó que la orientación influye directamente en la respuesta térmica, siendo mayor la variabilidad en muros expuestos a radiación solar intensa. El modelo CFD demostró capacidad para reproducir tendencias térmicas reales, validando su estatus como un instrumento de precisión para los análisis de comodidad térmica y la implementación de estrategias de diseño pasivo. Para concluir, la calibración de simulaciones con base en datos experimentales puede contribuir en la planeación arquitectónica y urbanística en contextos climáticos específicos.

Palabras clave: análisis térmico, calentamiento global, CFD, confort térmico, radiación solar, transferencia de calor.

Abstract

This study analyzes the indoor thermal behavior of a building constructed in Huimilpan, Querétaro, by comparing experimental measurements taken with an infrared thermal imaging camera versus numerical simulations based on computational fluid dynamics (CFD). The 16.38 m² building consists of concrete block walls, a galvanized sheet metal roof, as well as cast-in-place concrete structural elements. All measurements were taken on June 7, 2025, at 2:00 p.m., recording surface temperatures on interior walls and external environmental conditions. Sequentially, a three-dimensional virtual model was constructed by means of a poly-hexcore mesh, and boundary conditions based on *in situ* data were applied, including solar radiation

and cross-ventilation. The results show high consistency between simulated and experimental values, with determination coefficients greater than 0.93 on the four walls evaluated. It was found that orientation has direct influence on the thermal response, with greater variability observed in walls exposed to intense solar radiation. The CFD model demonstrated its ability to reproduce observed thermal trends, validating its reliability as a tool in thermal comfort analysis and in the implementation of passive design strategies. It is concluded that the integration of simulations calibrated with experimental data can support architectural and urban planning in specific climatic contexts.

Keywords: thermal analysis, global warming, CFD, thermal comfort, solar radiation, heat transfer.



Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático afirma que la influencia humana ha provocado incrementos sostenidos en la temperatura media global de la atmósfera, la tierra y el océano, así como la intensificación de climas extremos, tanto en poder destructivo como frecuencia. Así, el calentamiento global, aunado al cambio de uso de suelo debido a la urbanización creciente, ha causado el aumento progresivo en las temperaturas máximas, en particular durante la temporada de primavera, en el estado de Querétaro [1], [2], [3]. Luego, las condiciones térmicas son cada vez más desfavorables al interior de las viviendas [4], especialmente en las construidas con materiales convencionales, pero sin estrategias de diseño pasivo para la atenuación térmica.

La radiación solar influye en el confort térmico de un edificio, especialmente en áreas cercanas a ventanas, al interactuar con parámetros como la orientación, la transmitancia y las proporciones entre vanos y muros [5]. Asimismo, la construcción y operación de los edificios representan el 23 % del consumo energético global y alrededor del 40 % de las emisiones de CO₂. Ante estos problemas la planeación de un edificio debe ponderar su contexto local (orientación, ventilación natural, radiación solar, etc.) [6]. No obstante, se ha evidenciado que la transferencia de calor por convección en superficies externas puede superar de tres a cuatro veces la transferencia por radiación [7], por lo que el confort al interior de una vivienda también depende de la constitución material del edificio en sí.

El presente estudio aplica la dinámica de fluidos computacional (CFD) [8] para evaluar el comportamiento térmico al interior de un edificio habitacional; posteriormente, efectúa una comparación entre las temperaturas superficiales reales medidas con cámara termográfica infrarroja y las obtenidas mediante simulaciones numéricas. El objetivo es evaluar la capacidad del modelo CFD para reproducir el comportamiento térmico observado en el recinto real. De esta manera, el trabajo aporta evidencia sobre la aplicabilidad de herramientas CFD en el análisis del comportamiento térmico de edificaciones en contextos climáticos específicos, contribuyendo también a su uso como herramienta de apoyo en la implementación de estrategias de diseño pasivo.

Fundamentos teóricos

El análisis térmico del recinto involucra fenómenos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, los cuales actúan de manera conjunta.



Calor (Q)

El calor es una forma de energía en tránsito; por tanto, solo tiene sentido durante un proceso de intercambio energético entre dos sistemas o entre un sistema y su entorno. Los cuerpos no almacenan calor, sino energía interna. Siempre que dos o más cuerpos a diferente temperatura se encuentren, habrá una transferencia de dicha energía interna (energía térmica) del sistema más energizado al menos energizado: a esa transferencia se le denomina *calor*. Al respecto, existen tres mecanismos alternativos de transferencia: radiación, conducción y convección, y todos participan en mayor o menor grado en los procesos reales [9].

Calor específico (Cp)

El intercambio de calor sensible origina una variación de la temperatura del sistema. Sin embargo, si se suministra calor a dos cuerpos con la misma masa y temperatura inicial, la temperatura final puede ser distinta, según la naturaleza de cada cuerpo. Esta propiedad se conoce como *calor específico*, y se define como la cantidad de calor (kJ) que debe absorber 1 kilogramo de sustancia para aumentar su temperatura 1 kelvin. Sus unidades son kJ/kg·K.

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (1)$$

Donde:

C_p calor específico (kJ/kg·K)

Q calor transferido (kJ)

m masa de la sustancia

ΔT variación de temperatura (K)

$$\Delta T = T_{final} - T_{inicial} \quad (2)$$

La capacidad calorífica es un parámetro que indica la capacidad de una sustancia para experimentar cambios de temperatura al absorber o ceder calor. Se denota por C , sus unidades son kJ/K y se define como:

$$C = m \cdot C_p \quad (3)$$



Conducción

La conducción es la transferencia de energía térmica de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia mediante las interacciones entre ellas, originadas por un gradiente de temperatura, sin que exista movimiento macroscópico de materia.

Convección

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos: el movimiento molecular aleatorio (difusión) y el movimiento global (o macroscópico) del fluido. La convección se asocia con el hecho de que, en presencia de un gradiente de temperatura, grandes agregados de moléculas se mueven de forma colectiva. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe a una superposición de transporte de energía por difusión y por el movimiento global del fluido. Se acostumbra a utilizar el término *convección* cuando se habla del transporte acumulado y el término *advección* cuando se habla del transporte debido al movimiento volumétrico a gran escala del fluido.

Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, y puede provenir de sólidos, líquidos y gases. Sin importar el estado de la materia, la radiación se puede atribuir a variaciones en las configuraciones electrónicas de los átomos o las moléculas que la constituyen. La energía del campo de radiación es transmitida por las ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones); por lo tanto, mientras la transferencia de energía por conducción o convección requiere de la presencia de un medio material, la radiación puede darse en el vacío [10].

Dinámica de fluidos computacional

La CFD es una rama de la mecánica de fluidos que recurre a aplicaciones informáticas para analizar y resolver problemas que involucran el movimiento de fluidos, como los métodos de volúmenes finitos, diferencias finitas o elementos finitos. Simplifica las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo y el transporte de energía y masa (como las de Navier-Stokes) en sistemas algebraicos que luego se resuelven usando algoritmos computacionales. Esto permite predecir



de forma detallada, precisa y confiable el comportamiento de fluidos en escenarios complejos, sin la necesidad de recurrir a experimentos físicos o soluciones analíticas [11], [12].

Elemento finito

El método numérico de los elementos finitos (MEF) se emplea principalmente para resolver problemas de física e ingeniería; no es un método universal, pero posee una gran versatilidad que ha permitido su aplicación en una amplia gama de disciplinas, como la mecánica de sólidos, la transferencia de calor, la dinámica de fluidos y el electromagnetismo, entre otras [13]. El MEF divide un dominio complejo (que puede ser un cuerpo o estructura) en segmentos llamados elementos finitos, conectados en puntos específicos (nodos). A este procedimiento se le conoce como discretización, y en análisis por elementos finitos (FEA, en inglés) permite reducir la necesidad de ensayos físicos de validación al solucionar problemas complejos [14].

Diseño solar pasivo

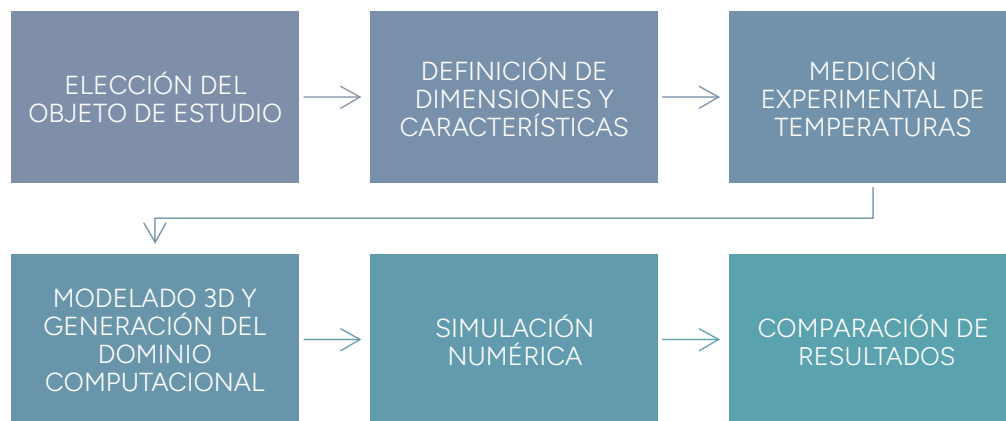
El diseño ecológico se concibe como una estrategia integral que, además de priorizar la reducción del consumo energético, implementa alternativas para reducir el impacto ambiental asociado a la producción de residuos y el consumo de recursos naturales [15]. Dentro de este enfoque, el diseño solar pasivo refiere a la implementación de sistemas constructivos, materiales y soluciones arquitectónicas orientados a mejorar el rendimiento energético del edificio en aspectos como calefacción, refrigeración e iluminación a partir del aprovechamiento de la energía solar sin la implementación de equipamiento adicional a la construcción. La importancia relativa de este ahorro energético varía según la situación y la función del edificio.

Materiales y métodos

Se definió de manera esquemática el procedimiento general seguido en este trabajo, desde la descripción del objeto de estudio hasta la comparación de los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación numérica. El diagrama de la Figura 1 muestra las fases que se siguieron para llevar a cabo el estudio.



FIGURA 1.
Diagrama de la metodología aplicada.
Fuente: elaboración propia.



Objeto de estudio

Se evaluó el comportamiento térmico interior de un recinto ubicado en el municipio de Huimilpan, Querétaro (20.374119, -100.281267). Este espacio cuenta con un área de construcción de 16.38 m² y está constituido como se indica a continuación: los muros están conformados de bloques de concreto macizo; los castillos, dalas y firme, de concreto colado, y la cubierta es de lámina galvanizada. Presenta su eje longitudinal inclinado a 20° al norte respecto del eje oriente-poniente, como se muestra en la Figura 2.

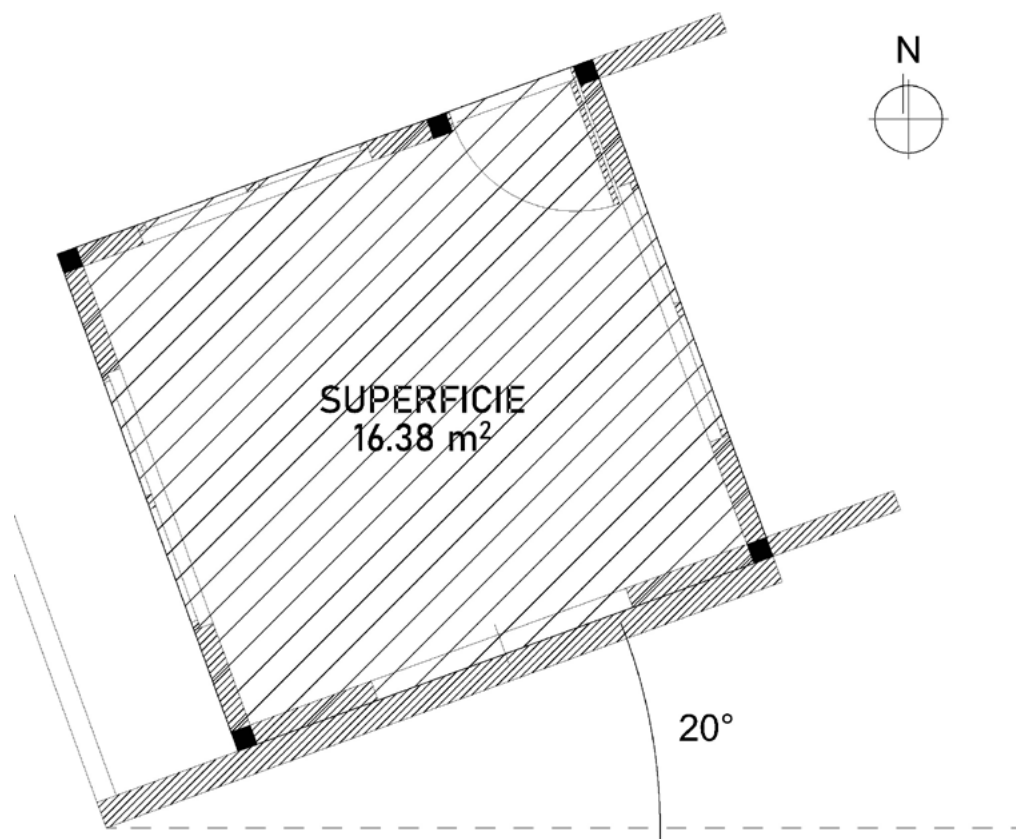


FIGURA 2.
Orientación.
Fuente: elaboración propia.

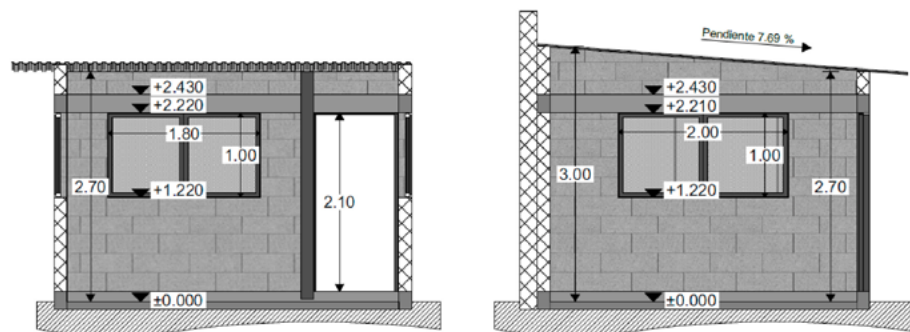
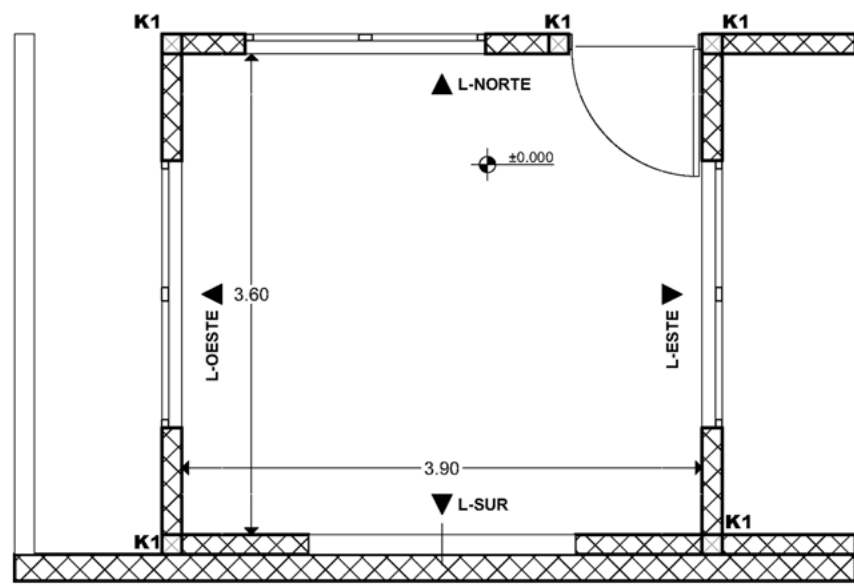


Definición de dimensiones y características del objeto de estudio

Se realizó un levantamiento arquitectónico del recinto para registrar sus dimensiones exactas, identificar características geométricas relevantes, y trasladarlas a un modelo tridimensional sobre el cual efectuar el análisis CFD. A partir de este levantamiento, se obtuvieron los parámetros exhibidos en las Figuras 3 y 4.

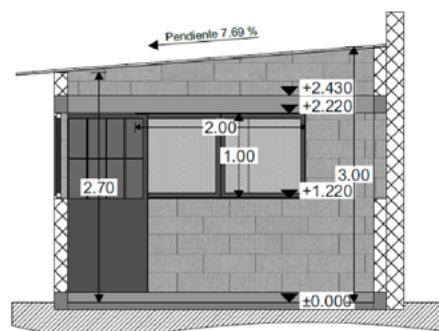
FIGURA 3.

Planta arquitectónica.
Fuente: elaboración propia.

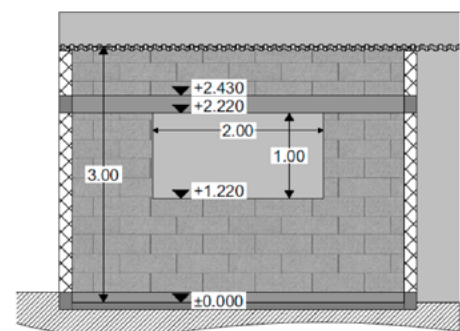


a) Elevación interior del paramento norte

b) Elevación interior del paramento oeste



c) Elevación interior del paramento este



d) Elevación interior del paramento sur

FIGURA 4.

Elevaciones interiores.
Fuente: elaboración propia.



Medición experimental de temperaturas

Los datos se recopilaron en el sitio el 7 de junio de 2025 a las 14:00 horas, horario en que la radiación global mensual puede superar los 200 kWh/m^2 [16] en el estado de Querétaro. En primer lugar, se midió la velocidad y temperatura del viento mediante un anemómetro multiparámetro Testo 445 [17]; después, con una cámara termográfica FLIR i5 [18], se tomaron las temperaturas superficiales en dos puntos de los muros al interior del recinto: el primero a 30 cm de altura desde el nivel de piso terminado y el segundo a 20 cm por debajo del antepecho de cada ventana. Estas alturas se ubican dentro de la zona vertical de ocupación establecida por la ASHRAE, la cual se define entre 0.10 m y 1.10 m para usuarios sentados y hasta 1.70 m para usuarios de pie [19]. Al mismo tiempo, se localizan dentro de la franja de influencia térmica que presenta mayor probabilidad de provocar incomodidad térmica por radiación solar (a menos de 2 m de las ventanas) [5]. La ubicación de los puntos de medición y su relación con la zona de ocupación se presentan en la Figura 5.

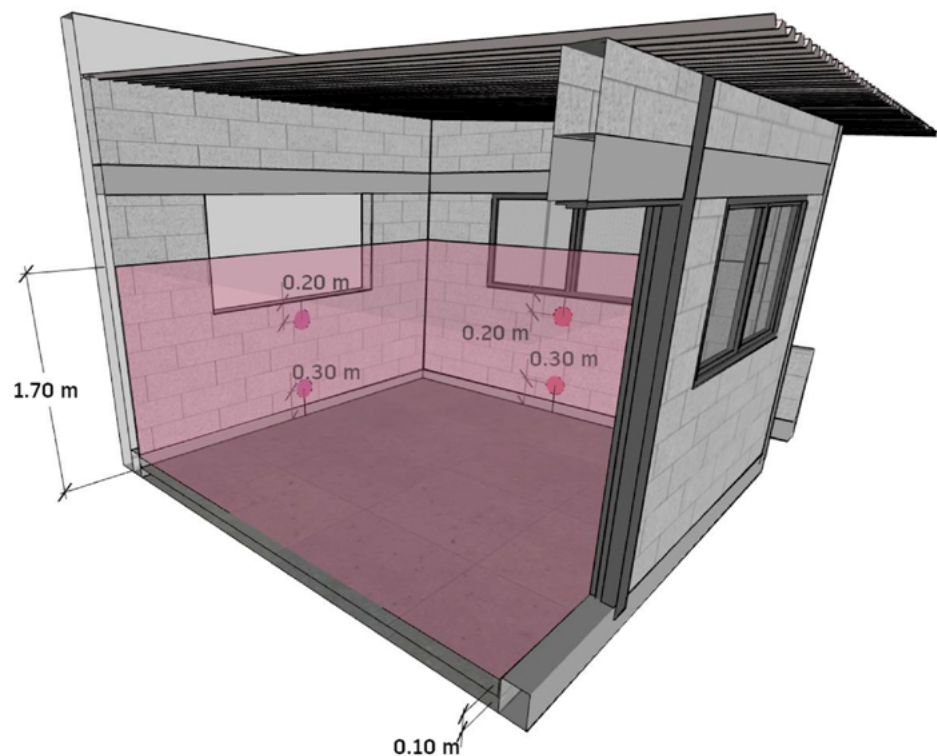


FIGURA 5.
Área de ocupación
en el recinto.
Fuente: elaboración
propia.

Los puntos de medición fueron previamente definidos y localizados sobre la superficie interior de cada muro para facilitar su identificación durante el trabajo de campo y asegurar su correspondencia con el modelo tridimensional. Asimismo, se generó una distribución de valores intermedios a partir de las

temperaturas medidas en campo, mediante una interpolación lineal entre los puntos extremos registrados en cada muro a fin de establecer un conjunto de datos comparables con los resultados del modelo numérico. Las temperaturas tomadas *in situ* se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1.
Temperaturas superficiales promedio de los muros interiores. Fuente: elaboración propia.

MURO	ALTURA DEL PUNTO (CM)	TEMPERATURA SUPERFICIAL (°C)
Norte	30	26.43 ± 0.12
	102	23.97 ± 0.23
Oeste	30	25.67 ± 0.21
	102	23.47 ± 0.06
Sur	30	25.10 ± 0.00
	102	21.90 ± 0.17
Este	30	27.20 ± 0.10
	102	24.40 ± 0.10

Se capturó una temperatura promedio de 29.6 °C fuera del recinto, en un espacio libre de construcciones. Las direcciones y velocidades del viento sondeadas a una altura de 1.50 m sobre el nivel del terreno se muestran en la Figura 6.

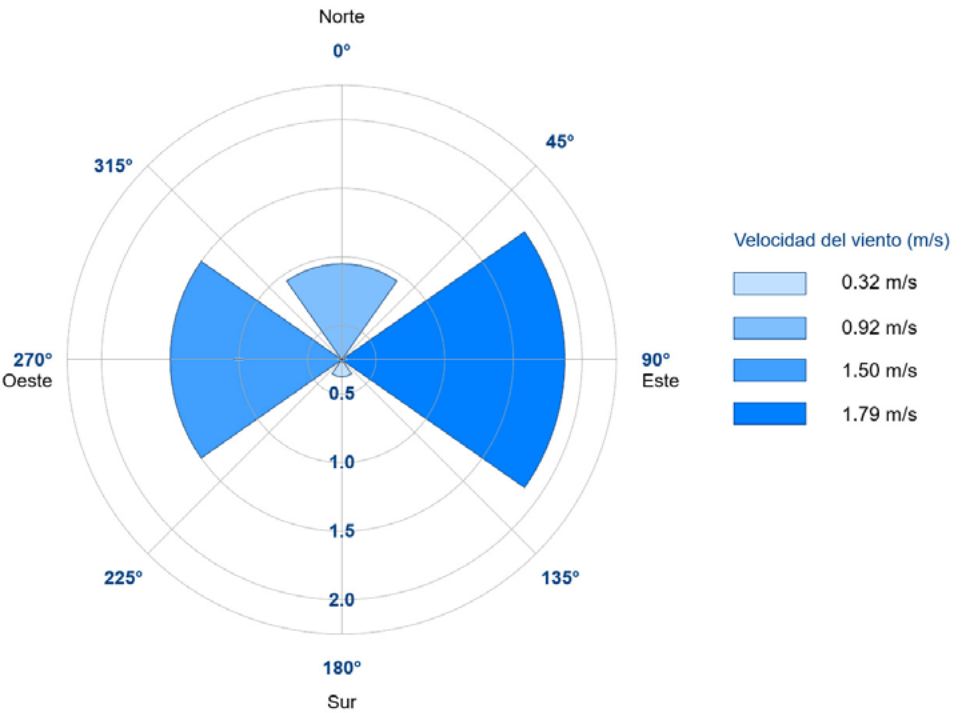
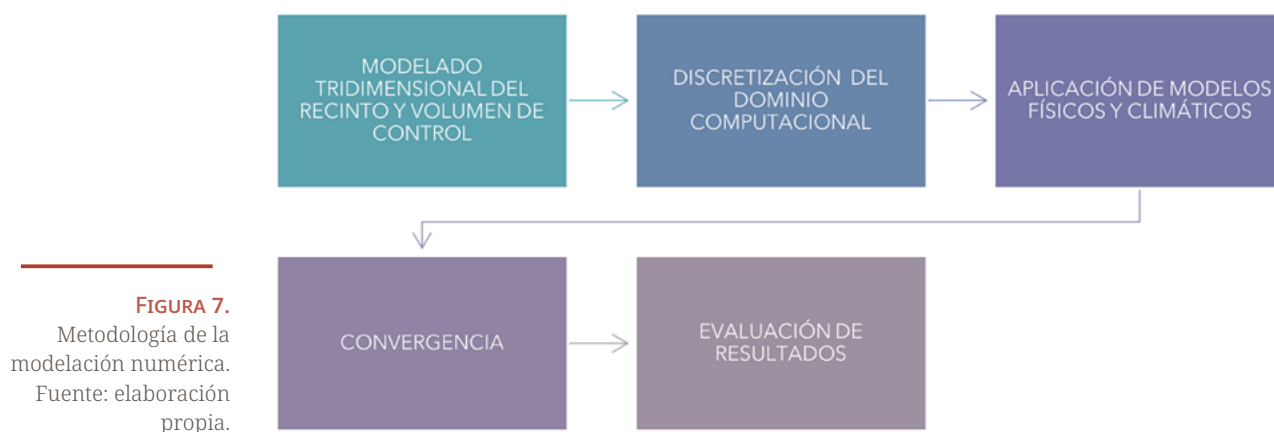


FIGURA 6.
Velocidades del viento
tomadas *in situ*.
Fuente: elaboración
propia.



Modelado 3D y generación del dominio computacional

El estudio aborda el proceso de transferencia de calor, que involucra fenómenos como conducción, convección y radiación. Por tanto, se busca simular el comportamiento térmico al interior del recinto a través del método de CFD. Para llevar a término esta simulación, se siguieron las etapas dispuestas en la Figura 7.



Se generó un modelo virtual 3D con base en las dimensiones reales del espacio construido. La edificación, en estado de obra gris, presenta condiciones ideales para considerar exclusivamente las propiedades térmicas de los materiales principales (sin la influencia de recubrimientos ni acabados superficiales), para los que se consideraron los valores térmicos reportados en la literatura [9], [20], [21] (Tabla 2). Además, la simulación asume que tanto la puerta como las ventanas permanecen completamente abiertas. Las ventanas cuentan con una malla de amplia apertura que permite el paso del viento sin obstrucciones significativas, mientras que la puerta se representó totalmente abierta para facilitar la entrada y salida del aire; en conjunto, esta configuración propicia una ventilación cruzada.

TABLA 2.

Propiedades térmicas de los materiales considerados en el modelo. Fuente: elaboración propia.

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/(kg·K))	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/(m·K))
Concreto colado	2300	880	1.40
Bloque de concreto macizo	1800	840	1.815
Lámina galvanizada	7850	475	45



Para evitar interferencias en el flujo y garantizar la precisión de los resultados, estudios previos señalan que las dimensiones del dominio deben definirse como múltiplos de la altura de la cumbrera (H) [22]. En este sentido, para el análisis de transferencia de calor por convección de edificios en entornos urbanos, se han propuesto medidas de hasta $23H \times 15H \times 6H$ [7]. Para el caso de estudio, la altura del dominio se fijó en cinco veces la altura máxima del techo ($5H$); en los laterales se definió como cinco veces el ancho del recinto ($5W$); en la parte posterior, correspondiente a la entrada (*inlet*), se fijó a tres veces la longitud del recinto ($3L$); y en la salida (*outlet*) se estableció en quince longitudes ($15L$), como se muestra en la Figura 8.

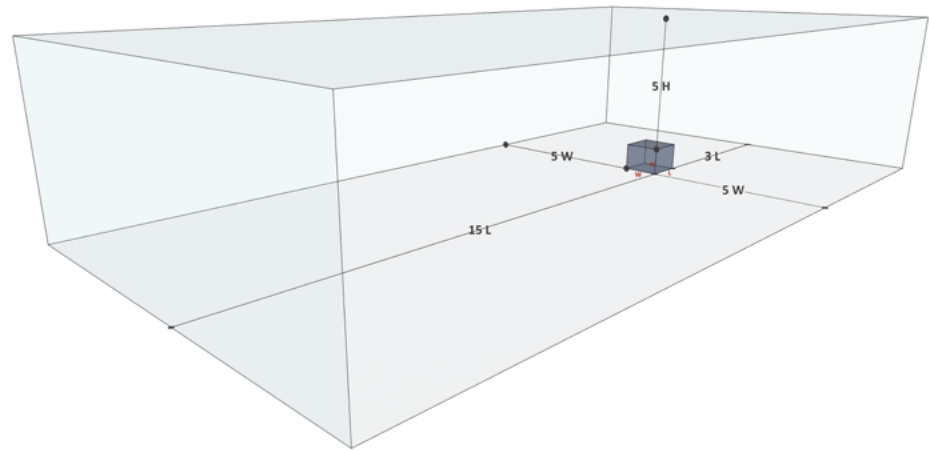


FIGURA 8.
Dimensiones del
dominio computacional.
Fuente: elaboración
propia.

A fin de representar condiciones de contorno abiertas y reducir la influencia de las fronteras artificiales sobre el flujo interno, las condiciones de frontera se definieron según las pautas de la guía ANSYS Fluent: el *inlet* se modeló como *velocity inlet*; el *outlet*, como *pressure outlet*; el resto de los límites del dominio computacional, como *symmetry* [23].

Las técnicas de generación de mallas no estructuradas, las cuales pueden constar de celdas tetraédricas, hexaédricas, poliédricas, prismáticas o piramidales, combinan bloques geométricos básicos con amplios datos geométricos para automatizar el proceso [24]. En este caso, se optó por una malla no estructurada debido a la inclinación que presenta la cubierta; sin embargo, incluso en mallas superficiales de alta calidad, es posible que aparezcan celdas asimétricas a causa de una distribución desigual del tamaño de celda o de limitaciones impuestas por las fronteras del modelo.

El modelo tridimensional del recinto fue discretizado a través de un mallado tipo *poly-hexcore*, compuesto por un total de 5 670 517 celdas y 654 316 caras. Las mallas *hexcore* pueden combinar la flexibilidad de las mallas tetraédricas,



hexaédricas y prismáticas con una cantidad reducida de celdas y una mayor relación *hex a tet* [25]. De acuerdo con los diagnósticos de calidad generados, el mallado presentó una calidad ortogonal mínima de 0.4001, valor considerado adecuado para simulaciones de flujo de aire [22]. El índice de *skewness* máximo fue de 0.3995, lo cual indica una buena calidad general del mallado, sin celdas críticas. El *aspect ratio* máximo fue de 14.48 para celdas volumétricas y de 26.34 para caras superficiales, sin presencia de celdas aisladas o intersecciones geométricas. El resultado gráfico del acomodo de celdas y refinamiento se presenta en las Figuras 9 y 10.

FIGURA 9.
Mallado en el dominio.
Fuente: elaboración propia.

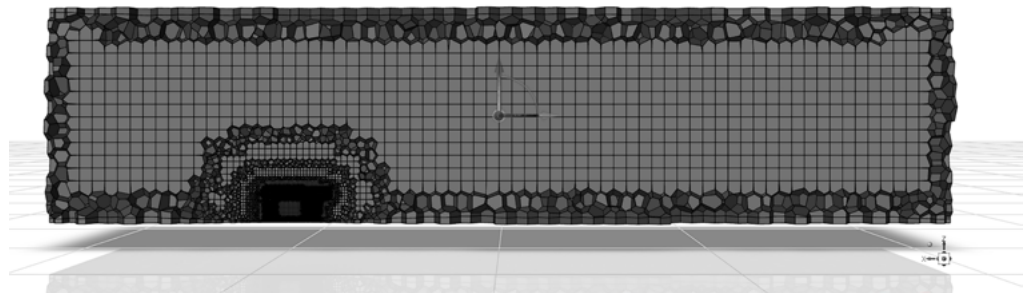
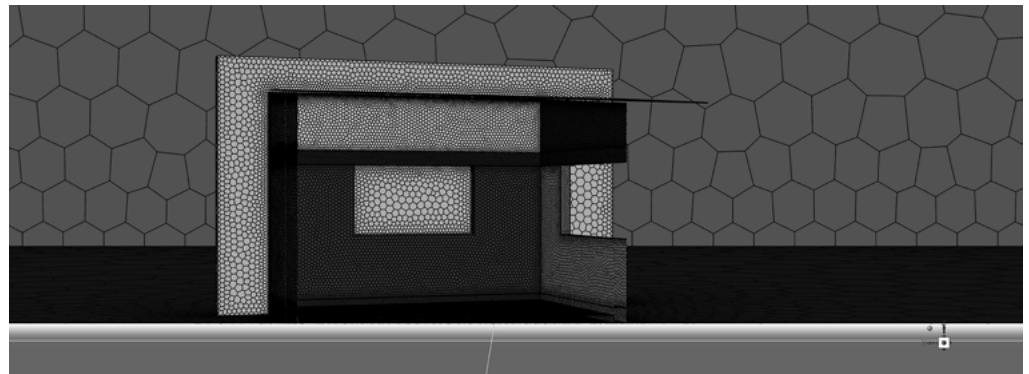


FIGURA 10.
Mallado en el recinto.
Fuente: elaboración propia.



Para modelar la turbulencia, se seleccionó el modelo SST (*shear stress transport*), reconocido por su fidelidad al predecir el flujo tanto en regiones cercanas a la pared como en zonas con separación del flujo. Este modelo combina las ventajas del modelo de turbulencia *kappa-omega* en la capa límite, mejorando la resolución para los gradientes de velocidad y temperatura, con las del modelo *kappa-epsilon* en el flujo libre, por lo que es idóneo para simulaciones de transferencia de calor y análisis aerodinámicos en geometrías completas [7]. El aire fue modelado como un gas ideal para representar el efecto de variaciones térmicas sobre la densidad y otras propiedades del fluido. A su vez, los materiales que componen el recinto (muros, cubierta y piso) fueron definidos de acuerdo con sus valores específicos reales de conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad.



Para representar el comportamiento térmico interior bajo contextos climáticos reales, se aplicaron condiciones de frontera definidas a partir de las mediciones realizadas *in situ* de temperatura y velocidad del aire, 29.6 °C y 1.5 m/s, respectivamente, con una dirección este-oeste. Se aplicó una presión atmosférica de 80 320 Pa, calculada a partir de la altitud promedio del sitio (2300 msnm) a temperatura ambiente. Se implementó un régimen estacionario para facilitar la comparación directa con las temperaturas superficiales medidas mediante termografía infrarroja.

Las condiciones de radiación solar se definieron bajo un escenario de cielo despejado (*fair weather conditions*), considerando la orientación solar correspondiente a la fecha de simulación, el 7 de junio del 2025. Se trazó un vector solar con componentes $X = -0.3362$, $Y = -0.0375$, $Z = 0.9410$, equivalente al ángulo de incidencia que se esperaría sobre la ubicación a las 14:00 horas.

Se empleó el modelo de radiación *discrete ordinates* (DO), con una irradiancia solar directa y difusa, y una discretización angular de 3×3 divisiones (*theta/phi*), con intervalos de actualización a cada 10 iteraciones. El factor de radiación solar directa fue de 0.70, lo que se considera alto. La irradiancia solar directa normal sobre la superficie terrestre se estableció en 641.05 W/m², mientras que la irradiancia difusa alcanzó los 73.77 W/m² sobre las superficies verticales y 100.55 W/m² sobre superficies horizontales. Además, se fijó una irradiancia solar reflejada desde el suelo de 96.23 W/m² sobre las superficies verticales del recinto.

Con la finalidad de asegurar la convergencia, se realizaron 1500 iteraciones, durante las que se puso cuidado en que los parámetros *energy* y *DO-intensity* permanecieran estables en $1e^{-7}$ y $1e^{-8}$. Asimismo, que las velocidades *velocity-x*, *velocity-y* y *velocity-z* convergieran a valores del orden de $1e^{-5}$, y que *continuity* y turbulencia (κ/ω) se mantuvieran en meseta estable. Por último, además del criterio numérico basado en los residuales, se aplicó como criterio físico el balance de masa: se calculó una diferencia entre los flujos de entrada y salida de $-1.57 e^{-5}$ kg/s, es decir, un desbalance despreciable, con un error relativo del orden de $1e^{-9}$.

Resultados y discusión

Una vez que transcurrieron las mil quinientas iteraciones de la simulación, se registraron los resultados para llevar a cabo la comparación entre los valores reales y simulados. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados



de las temperaturas superficiales por cada muro obtenidas mediante la simulación numérica.

En el muro este, la regresión lineal entre los datos medidos y los simulados mostró un coeficiente de determinación R^2 de 0.9357, lo que indica una correlación fuerte entre ambas mediciones. La pendiente de 4.19 refleja la relación entre los valores simulados y medidos, evidenciando una tendencia consistente entre ambos conjuntos de datos, como se muestra en la Figura 11. Esta relación puede estar influenciada por la orientación del muro y su mayor exposición a la radiación solar incidente durante el periodo analizado.

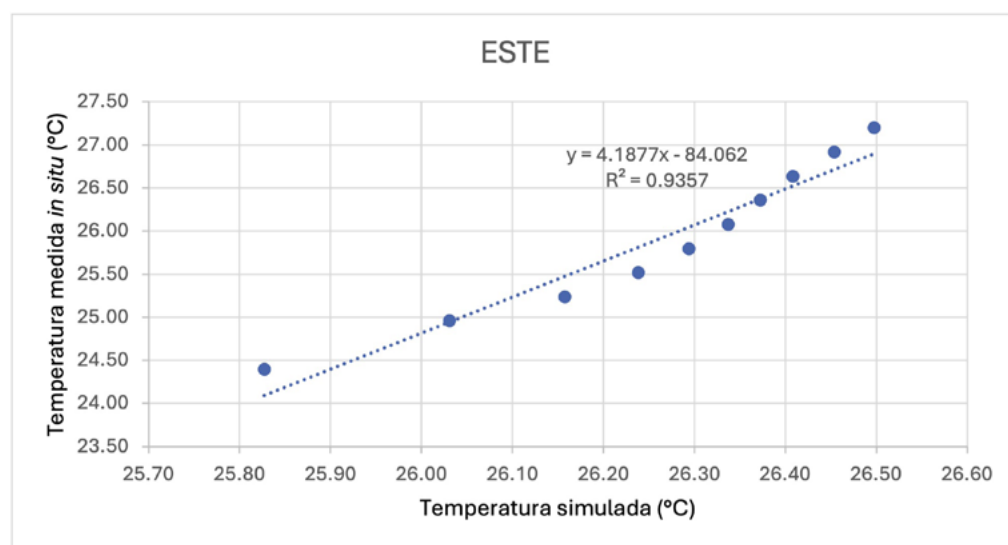


FIGURA 11.

Correlación de temperaturas interiores: medición y simulación (muro este).
Fuente: elaboración propia.

En el muro norte se observó una pendiente de 2.49 y el valor más alto de ajuste lineal entre los cuatro muros, con un R^2 de 0.9919. Esto sugiere que, si bien las variaciones térmicas son menores en esta orientación, el comportamiento simulado refleja con gran precisión las condiciones medidas, como se muestra en la Figura 12.

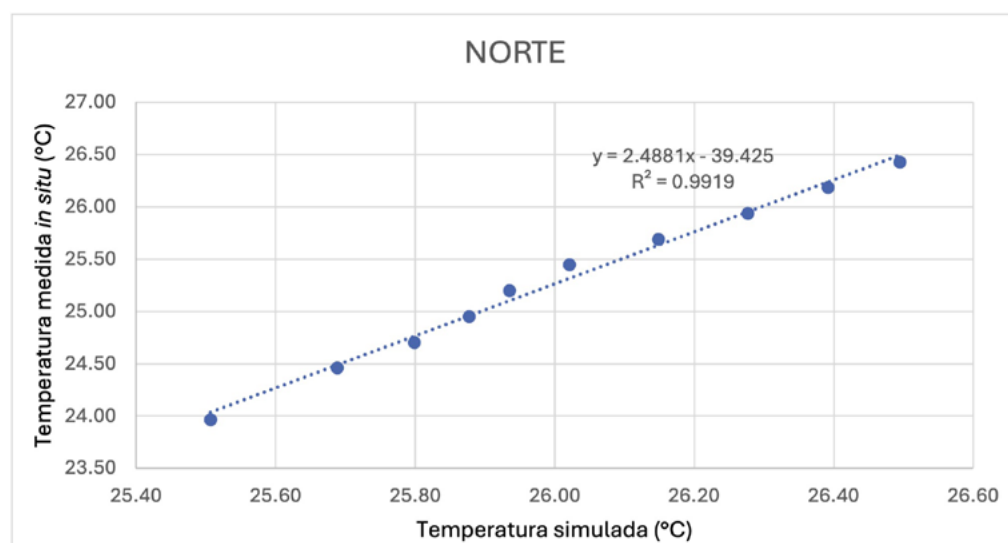


FIGURA 12.

Correlación de temperaturas interiores: medición y simulación (muro norte).
Fuente: elaboración propia.



En el muro oeste se observó una pendiente de 3.50 y un $R^2 = 0.9642$. Este muro mostró una correlación sólida, indicando una buena representación numérica del comportamiento térmico a las 14:00 h. Esta orientación se ubica en el lado opuesto al flujo de entrada, lo que refuerza el efecto acumulado de la radiación en horas de mayor carga térmica. La relación se puede observar en la Figura 13.

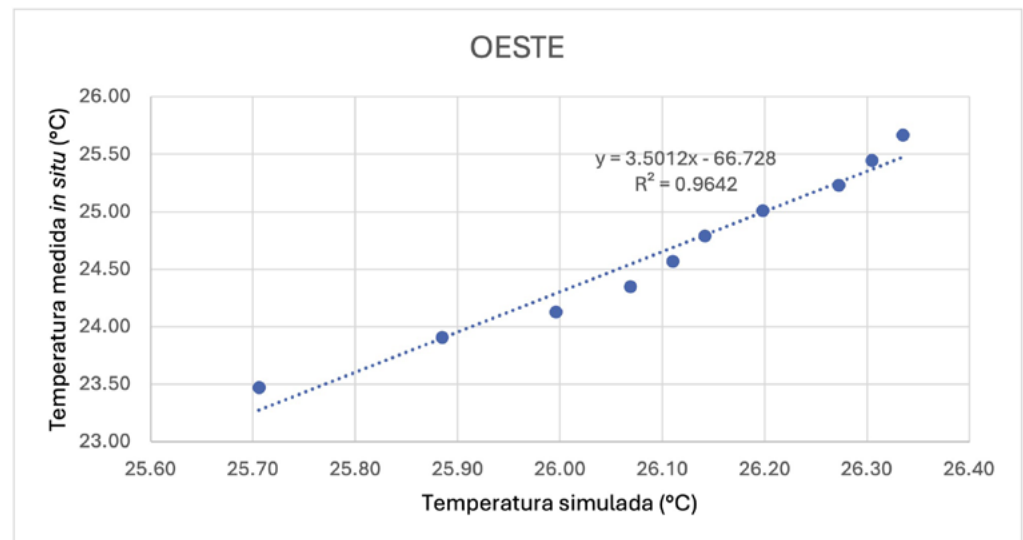


FIGURA 13.
Correlación de temperaturas interiores:
medición y simulación
(muro oeste).
Fuente: elaboración propia.

En el muro sur, la pendiente fue de 2.95, con un $R^2 = 0.9909$, lo que representa también una relación estrecha entre datos simulados y medidos. La exposición solar en esta orientación es significativa durante gran parte del día y, aunque la pendiente es ligeramente menor que en los muros este y oeste, la relación presenta una alta precisión, como se muestra en la Figura 14.

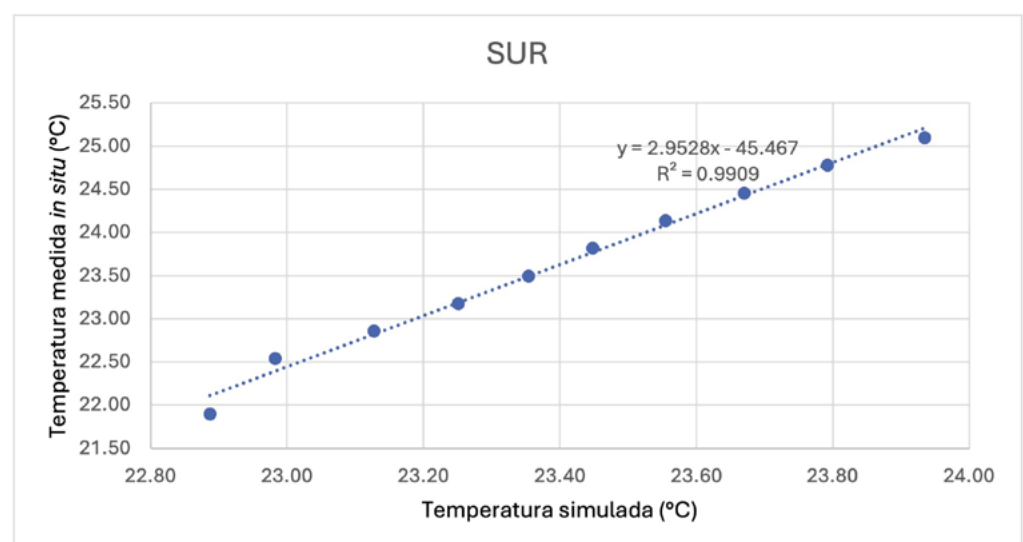


FIGURA 14.
Correlación de temperaturas interiores:
medición y simulación
(muro sur).
Fuente: elaboración propia.



Conclusión

Para analizar el comportamiento térmico de un recinto en Huimilpan, Querétaro, se compararon las temperaturas superficiales en los muros interiores del recinto medidas *in situ* contra los resultados obtenidos mediante simulación numérica. A través de esta comparación se evaluó la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento térmico observado y, con ello, respaldar su aplicación en el estudio del comportamiento térmico al interior de edificaciones bajo condiciones climáticas locales.

Los resultados muestran que las temperaturas simuladas y las medidas *in situ* presentan una alta concordancia para los cuatro muros evaluados, con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0.93 en todos los casos. Esto indica que el modelo numérico es capaz de representar de manera adecuada el comportamiento térmico del recinto, logrando reproducir las tendencias observadas en las mediciones experimentales. A pesar de que las diferencias entre los valores simulados y experimentales son reducidas, estas pueden atribuirse a la variabilidad de las condiciones reales.

Se identificó que la orientación influye de manera directa en la respuesta térmica de los muros. Aquellos con superficies con mayor exposición a la radiación solar presentan una mayor variabilidad térmica, mientras que los muros con una menor incidencia solar muestran un comportamiento más estable. Esta relación entre la radiación incidente, la orientación y la respuesta térmica refuerzan la importancia de considerar estrategias de diseño pasivo, especialmente en elementos con alta exposición, como muros exteriores y cubiertas, y en contextos climáticos como el del estado de Querétaro.

Adicionalmente, los resultados sugieren que los modelos de simulación numérica, cuando son calibrados mediante datos experimentales, pueden emplearse como una herramienta confiable para evaluar el comportamiento térmico de edificaciones. Esto permite anticipar condiciones de confort térmico y respaldar la toma de decisiones en el diseño, particularmente en la implementación de estrategias pasivas orientadas a la reducción de ganancias térmicas.

Finalmente, aunque el modelo mostró un buen desempeño general, las diferencias observadas pueden estar asociadas a la simplificación de ciertas variables presentes en condiciones reales, como la variabilidad de la radiación solar y las condiciones de ventilación. En este sentido, futuras investigaciones podrían incorporar un mayor número de puntos de medición, así como evaluar distintos escenarios climáticos y configuraciones constructivas, con el fin de forta-



lecer la validación del modelo y ampliar su aplicación en estudios de confort térmico. Asimismo, la incorporación de modelos físicos adicionales, como el transporte de especies, permitiría considerar de manera más detallada la composición del aire, incluyendo efectos asociados a la humedad y a la presencia de distintos gases. Esto contribuiría a una representación más completa de las condiciones ambientales interiores y a un análisis más integral del confort térmico en espacios habitados.

Adicionalmente, este tipo de enfoques puede extenderse a escalas mayores, como el análisis del comportamiento térmico en entornos urbanos, donde otras variables, además de la orientación de las edificaciones, la densidad urbana y la configuración del espacio construido, podrían influir en las condiciones microclimáticas. En este sentido, la integración de modelos numéricos validados con datos experimentales representa una herramienta valiosa para apoyar la planeación urbana y el diseño de ciudades más eficientes.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación, así como a los revisores, cuyas observaciones y sugerencias contribuyeron significativamente. También expresamos nuestro reconocimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, cuyo programa de becas hizo posible la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Comisión Nacional del Agua (Conagua), "Resumen mensual de temperaturas máximas: Abril 2025, Ciudad de México". Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- [2] P. R. Mondelo, E. Gregori Torada, S. Comas Úriz, E. Castejón Vilella y E. Bartolomé Lacambra, *Ergonomía 2. Confort y estrés térmico*. México: Alfaomega, 2001.
- [3] Servicio Meteorológico Nacional, "Temperatura Máxima Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2025", Servicio Meteorológico Nacional. <https://www.gob.mx/smn/es/articulos/temperaturas-maximas-del-pais>
- [4] V. Masson-Delmotte, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte et al., Eds. Reino Unido y Estados Unidos: Cambridge University Press, 2023, DOI: [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896)
- [5] X. Xiang, Y. He, y N. Li, "Evaluating annual thermal discomfort time ratio of indoor occupants caused by solar radiation using a novel model", *Architectural Intelligence*, vol. 3, 2024, DOI: [10.1007/s44223-024-00072-1](https://doi.org/10.1007/s44223-024-00072-1)
- [6] G. Betti, F. Tartarini, C. Nguyen y S. Schiavon, "CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design", *Building Simulation*, vol. 17, pp. 493-508, 2023, DOI: [10.1007/s12273-023-1090-5](https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5)
- [7] A. De Lieto Vollaro, G. Galli, y A. Vallati, "CFD Analysis of Convective Heat Transfer Coefficient on External Surfaces of Buildings", *Sustainability*, vol. 7, núm. 7, pp. 9088-9099, 2015, DOI: [10.3390/su7079088](https://doi.org/10.3390/su7079088)



- [8] M. Hajdukiewicz, M. Geron y M. M. Keane, "Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments", *Building and Environment*, vol. 59, pp. 290-302, 2013, DOI: [10.1016/j.buildenv.2012.08.027](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.027)
- [9] J. A. Fernández Benítez y C. Corrochano Sánchez, *Fundamentos de Transmisión de Calor*, 2a ed. España: DEXTRA Editorial, 2014.
- [10] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, 4a ed. México: Prentice Hall, 1999.
- [11] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2a ed. Inglaterra: Pearson Education Limited, 2007.
- [12] T. Norton, D.-W. Sun, J. Grant, R. Fallon, y V. Dodd, "Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review", *Bioresource Technology*, vol. 98, núm. 12, 2007, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- [13] C. H. Galeano Urueña, J. M. Mantilla González, y J. C. Galvis Arrieta, *El método de los elementos finitos: un enfoque teórico práctico*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [14] R. A. Estrada Cingualbres, *Análisis por elementos finitos (FEA): cosmosWorks 2006*. Cuba: Editorial Universitaria, 2014.
- [15] C. Hernández Pezzi, *Un Vitruvio ecológico: principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible*. España: Gustavo Gili, 2012.
- [16] L. A. Mondragón del Ángel, "Acceso solar en México: Caso de estudio Querétaro", *SketchIn. Revista de Arquitectura y Diseño*, vol. 4, núm. 7, pp. 58-69, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uaq.mx/index.php/sketchin/article/view/58-69>
- [17] Testo SE & Co. KGaA, "testo 445 - Medidor para climatización". Testo. <https://www.testo.com/es-MX/testo-445/p/0560-4450>
- [18] Final Test, "FLIR-15, Cámara Termográfica. 9Hz, Rango de Medición de Temperatura de -20 °C a 250 °C (-4 °F a 482 °F), Resolución de 100 × 100 Píxeles, Enfoque Libre". Final Test. <https://www.finaltest.com.mx/FLIR-15-C-mara-Termo-p/flir-15.htm>
- [19] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ANSI/ASHRAE Standard 55, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Estados Unidos, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [20] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Estados Unidos: ASHRAE, 2021.
- [21] Integrated Environmental Solutions (IES), "Table 6 Thermal Conductivity, Specific Heat Capacity and Density". IES Virtual Environment Help. https://help.iesve.com/ve2021/table_6_thermal_conductivity_specific_heat_capacity_and_density.htm
- [22] R. W. Kim, I. B. Lee, y K. S. Kwon, "Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model", *Biosystems Engineering*, vol. 164, pp. 235-256, 2017, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008)
- [23] ANSYS, Inc., "Boundary Conditions". ANSYS Fluent User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/flu_ug_bcs_sec_bound_cond.html
- [24] ANSYS, Inc., "1.2. Program Capabilities". ANSYS Fluent User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/flu_ug_gs_sec_gs_capabilities.html
- [25] ANSYS, Inc., "6.1. Improving the Mesh". ANSYS Fluent User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/flu_ug/tgd_user_improve_mesh.html



Tendencias en control aplicado a robots móviles mediante visión externa

Review of the control applied to wheeled mobile robots using overhead vision

Arturo Iram de la Fuente Sánchez^{1*}
Gerardo Israel Pérez Soto¹
Jesús Franco Robles²

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

²XLIM Research Institute, Limoges, Francia

*adelafuente20@alumnos.uaq.mx

03

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

A. I. De la Fuente Sánchez, G. I. Pérez Soto, y J. Franco Robles, "Tendencias en control aplicado a robots móviles mediante visión externa", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm. 16, pp. 42-53, 2026.



Resumen

La investigación en robots móviles ha crecido de manera constante debido a su amplia gama de aplicaciones en sectores industriales, agrícolas y de rescate. Este artículo presenta una revisión de las estrategias de control aplicadas a robots móviles no holonómicos con ruedas, empleando cámaras externas en configuración ojo-a-mano. En contraste con otros sistemas de navegación basados en GPS o sensores montados a bordo, esta configuración decrementa la dependencia de señales exteriores y aligera los costos de instrumentación. La mayor porción de las propuestas analizadas se centran en controladores visuales no lineales y sin calibración, orientados a compensar parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara mediante leyes adaptativas. Estos mé-

todos habilitan completar tareas de localización, regulación de posición y seguimiento de trayectorias con robustez frente a perturbaciones dinámicas. Algunos trabajos incluyen procesos de calibración, logrando mayor precisión, aunque con mayor complejidad técnica. Los resultados experimentales sostienen la viabilidad de estos sistemas en condiciones reales, especialmente en ambientes enclaustrados y estructurados. Las perspectivas futuras apuntan a integrar visión por computadora con inteligencia artificial, para mejorar la autonomía, la adaptabilidad y la confiabilidad de los robots móviles en entornos más complejos. En conjunto, la tendencia se orienta hacia sistemas de control visual adaptables, económicos y robustos.

Palabras clave: configuración ojo-a-mano, control no lineal, localización de robots, robots móviles, seguimiento de trayectorias, servocontrol visual

Abstract

Research on mobile robots continues to expand due to their versatility in industrial, agricultural, and rescue applications. This article reviews control strategies for wheeled non-holonomic mobile robots using external overhead cameras in an eye-to-hand configuration. Unlike GPS or onboard sensors, this approach reduces dependence on external signals and minimizes instrumentation costs. The review highlights that most proposals employ nonlinear visual controllers without calibration, compensating for intrinsic and extrinsic camera parameters through adaptive laws. These methods allow robust localization, position regulation, and trajectory tracking, even under dy-

namic disturbances. Some works incorporate calibration, via geometric markers or dual-camera setups, achieving higher precision but at greater complexity. The analysis shows that eye-to-hand systems can be particularly effective in structured indoor environments, where a fixed camera can reliably track robot movements. Future perspectives emphasize integrating computer vision with artificial intelligence as a way to improve autonomy, reliability, as well as adaptability in more complex scenarios. Overall, the tendency aims toward low-cost, flexible, and resilient visual control systems able to expand mobile robot applicability in real-world tasks.

Keywords: eye-to-hand configuration, nonlinear control, robot localization, mobile robots, path tracking, visual servocontrol.



Introducción

Las investigaciones sobre robots móviles se incrementan día con día, ya que estos dispositivos pueden aplicarse en diversos sectores, desde la construcción [1] hasta las plantas nucleares [2]. Otras aplicaciones incluyen la reconstrucción digital de entornos cerrados, la navegación de vehículos guiados automáticamente en entornos industriales y la teleoperación en escenarios de búsqueda y rescate [3], [4], [5]. La clasificación de robots móviles varía según diversos factores, tales como el modo de locomoción, la operación y el ambiente; por ejemplo, Siciliano y Kathib [6] reconocen los siguientes tipos: biomiméticos, con ruedas, submarinos, aéreos, microrrobots y nanorrobots.

El diseño de robots móviles autónomos debe resolver los problemas de locomoción, percepción y localización-navegación [7]. La locomoción engloba la mecánica, la cinemática, la dinámica y otros elementos para el control motriz del robot, mientras que la percepción refiere a su tecnología sensorial. En última instancia, la navegación-localización emplea algoritmos y métodos para procesar la información de los sensores y encauzar la locomoción del robot, ya sea para alcanzar una ubicación o posición específica, evadir obstáculos o seguir una trayectoria, entre otros objetivos.

Al respecto, la investigación en robótica se encuentra en busca de modos de prescindir de los sistemas de navegación global satelital [8] (como el GPS), puesto que su efectividad depende de parámetros externos, tales como la intensidad de señal y la disponibilidad satelital. Por otro lado, de acuerdo con Kumar Panigrahi y S. Kishoro Bisoy [9], el problema de la localización consta de tres categorías:

- El seguimiento de posición, cuando la posición inicial del robot es conocida y se realiza un rastreo en tiempo real durante todo su desplazamiento.
- La localización global, cuando el robot desconoce su posición inicial, pero es capaz de localizarse dentro del entorno.
- El robot secuestrado, es decir, cuando se mueve inesperadamente y es necesario recuperarlo.

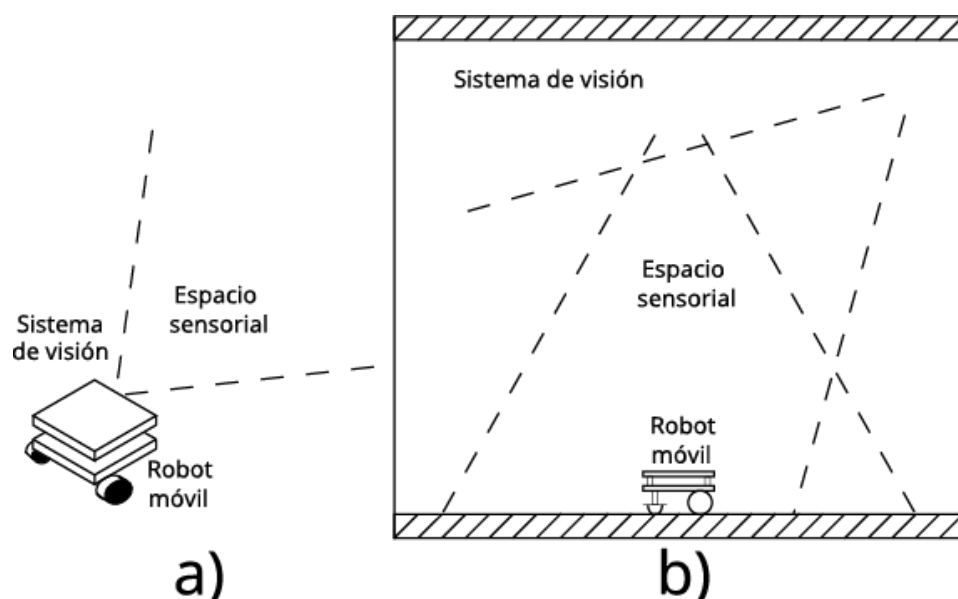
Para la solución de los problemas asociados a cada categoría, se han desarrollado herramientas como las aproximaciones probabilísticas, la construcción de mapas y la identificación por radiofrecuencia; cada uno de estos enfoques emplea diversos sensores, como cámaras, detectores ultrasónicos, láser y de radiofrecuencia, entre otros. En particular, los métodos basados en visión por computadora han demostrado mejor eficiencia en la precisión y el tiempo que el robot emplea para localizar y realizar sus tareas [10].



Cuando se diseña un controlador visual, existen dos configuraciones básicas: ojo-en-mano y ojo-a-mano [11] (Figura 1). En la configuración de ojo-en-mano, la cámara se monta en el robot móvil y se desplaza junto con él. En contraste, en la configuración de ojo-a-mano, la cámara se posciona de modo que proporcione una vista clara del robot y su área de trabajo, generalmente empotrada en el techo.

Actualmente existen investigaciones sobre la localización, la navegación y, en general, el control de robots móviles por medio de diferentes métodos y sensores [12], [13], [14]; también se han recapitulado las metodologías que involucran visión por computadora en [10], [15] y [16]. Estos artículos de revisión se enfocan a la localización y navegación de robots móviles principalmente basadas en cámaras o en sensores ojo-en-mano. Asimismo, la configuración ojo-a-mano ha tenido un gran avance en los últimos años dadas las potenciales aplicaciones en las áreas tanto industriales como de servicio a la población, pero no se ha realizado un análisis crítico de los trabajos dedicados a dicha configuración. Por tanto, el presente artículo se propone atender dicha laguna en el conocimiento al concentrar las investigaciones que priorizan la localización y el control de robots móviles en configuración ojo-a-mano.

FIGURA 1.
Configuraciones
utilizadas en
controladores visuales.
a) Ojo-en-mano.
b) Ojo-a-mano.
Fuente: elaboración
propia.



Metodología

Se realizó una búsqueda bibliográfica de publicaciones relevantes en robótica móvil, control visual y localización basada en visión, en bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SciELO y Redalyc. El criterio de búsqueda fue: ("mobile robot" AND "visual servoing" AND "localization")



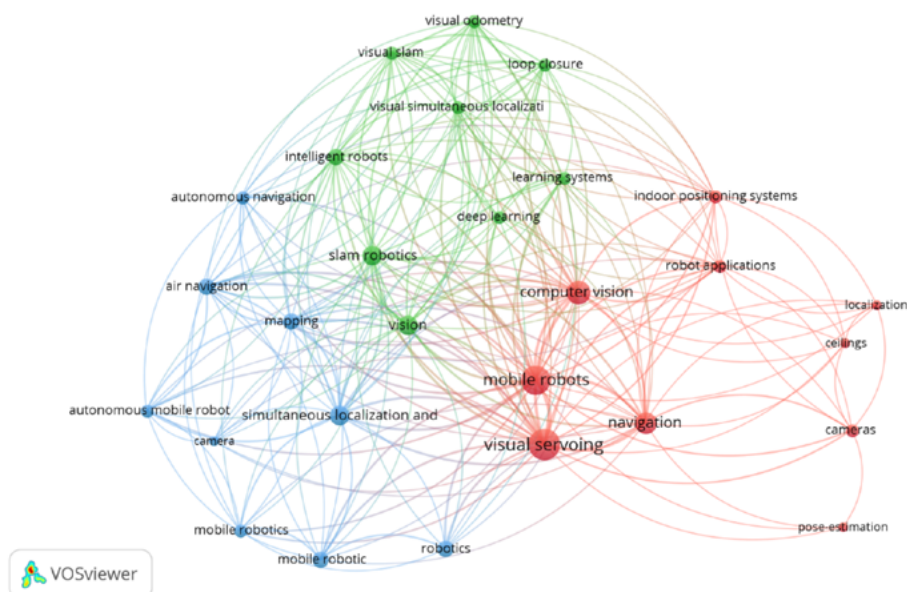
AND ("computer vision" OR "vision based" OR "position control" OR "overhead camera" OR "eye-to-hand"). El periodo de búsqueda comprendió de 2010 a 2025, puesto que las investigaciones orientadas al sistema ojo-a-mano en robots móviles son escasas.

Es importante mencionar que, con base en los resultados de la búsqueda, se aplicó como criterio de exclusión la eliminación de artículos científicos duplicados, capítulos de libros, memorias de congreso y artículos científicos de revisión. La búsqueda inicial se realizó en terminología general relacionada con la robótica móvil, el servocontrol visual y la localización. Al filtrar los artículos encontrados, se seleccionaron las metodologías que cumplieran con los criterios establecidos para el análisis detallado.

Resultados y discusión

La Figura 2 presenta un mapa bibliométrico generado con la plataforma de visualización de panorama científico VOSviewer. En él, se identifican las relaciones principales entre las palabras clave asociadas al control visual de robots móviles. Se observan los términos *mobile robots*, *visual servoing* y *computer vision*, que constituyen el núcleo temático, mientras que otros términos como *navigation*, *visual odometry*, *visual slam*, *visual simultaneous localization*, *vision*, *camera* y *ceilings* corresponden a áreas complementarias relacionadas con la percepción, la localización y la navegación visual. Si bien este contexto general abarca una amplia área de búsqueda, al incluir específicamente estrategias de control para robots móviles con visión externa en configuración ojo-a-mano, se obtuvo un total de once artículos relevantes para el análisis específico de esta revisión.

FIGURA 2.
Mapa bibliométrico
que muestra
la coocurrencia
de palabras clave.
Fuente: elaboración
propia.





En general, el uso de cámaras requiere de procesos de calibración, ya sea intrínseca o extrínseca. Sin embargo, hay propuestas que solucionan ese aspecto aplicando leyes de control que permiten a los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara compensarse entre sí [11], [17], [18], [19], [20], [21], [22]; y aunque dichas propuestas son similares, presentan diferencias notables. Liang *et al.* [11] realizan el control no lineal de la posición y la orientación del robot móvil por medio de una sola cámara, sin necesidad de sensores adicionales, ni detección de profundidad. Por otro lado, [17] y [18] controlan la posición del robot, pero no su orientación; en estos casos el diseño del controlador se centra en las velocidades y recurre a sensores de profundidad; la diferencia entre estos dos trabajos radica en que [18] implementa un controlador de trayectoria que permite predetermined el recorrido que ha de seguir el robot.

El control motriz en [19], [20] y [21] se basa en mantener la profundidad constante en el tiempo y la orientación de la cámara paralela al plano de movimiento del robot móvil. Por su lado, Yang y Wang [19] emplean un control no lineal de modos deslizantes para estabilizar el robot frente a las perturbaciones dinámicas. En cambio, [20] apunta a una estabilización exponencial donde el control se basa únicamente en la cinemática del robot; se ignoran las fuerzas no lineales y los otros parámetros de la dinámica. Por último, de manera similar a [19], [21] emplea un controlador de posición adaptativo que compensa las perturbaciones desconocidas y asegura la estabilidad asintótica global por medio de la técnica no lineal de modos deslizantes.

Liang *et al.* [22] proponen un control adaptativo de posición y trayectoria, el cual admite la profundidad variante con respecto al tiempo y elimina el paralelismo de la cámara respecto del robot; de igual manera, compensa la incertidumbre de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara; sin embargo, algunos se estiman en línea.

En lo que respecta a las propuestas que incluyen procesos de calibración, [23] y [24] emplean métodos de control de tipo “ir a la meta” (*go-to-goal*), basados en visión para robots móviles interiores no holonómicos. El procedimiento se divide en tres etapas; primero, para la calibración de la cámara, se colocan en el robot figuras geométricas de colores contrastantes con el suelo, por lo que se emplean filtros de visión por computadora para detectar bordes y determinar las coordenadas del robot móvil. En la segunda etapa se define la posición del robot relativa a la meta mediante una representación gráfica y una representación triangular. La última etapa presenta los resultados obtenidos al aplicar los métodos de control mencionados. La diferencia de ambos trabajos radica en que [24] presen-



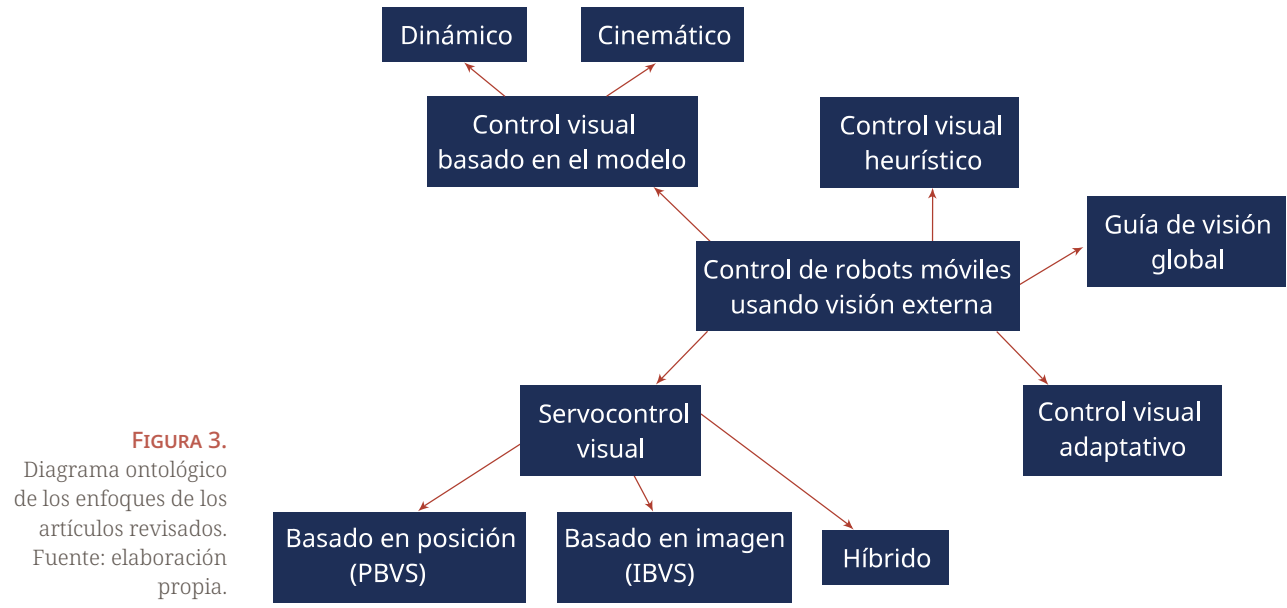
ta, además, una comparación entre el sistema propuesto contra un control PID difuso y un PID clásico.

En el caso de Zdešar *et al.* [25], se marca el robot para reconocer y rastrear su posición mediante un subsistema de visión por computadora. Para tal fin, se combinan un lazo de realimentación y otro de avance para implementar un control de dos grados de libertad. El lazo de avance conduce el sistema hacia la trayectoria de referencia y el lazo de realimentación elimina los errores causados por las perturbaciones. Además, se emplea un filtro de Kalman para estimar los estados del robot móvil y un modelo predictivo de control. Se concluye que la implementación del sistema presenta un controlador robusto en cuanto a su resistencia al ruido, además de un buen desempeño en el rastreo de la trayectoria.

Zheng y Lu [26] emplean dos cámaras, una de ellas ubicada perpendicularmente con respecto al suelo, y otra en un ángulo de 45 grados, alejada de la primera una distancia de dos metros (Figura 1b). También aplican un marcado sobre el robot, el cual corresponde a un sistema de posicionamiento de código abierto llamado Apriltag. Para obtener la orientación del robot se emplean dos marcas, una colocada en el centro y otra en la parte frontal, de forma paralela junto a la anterior. Adicional a la localización del robot, se emplea un algoritmo que utiliza un sensor ultrasónico para modificar su trayectoria cuando necesita evadir obstáculos. El sistema tiene flexibilidad, confiabilidad, expansibilidad y precisión móvil, sumadas a las ventajas en términos de costo.

A continuación, en la Figura 3 se presenta un diagrama ontológico que organiza los enfoques de control ojo-a-mano. De esta manera se distingue entre:

- Control visual basado en imágenes, sin calibración, para estabilizar la pose del robot y permitir el seguimiento de la trayectoria.
- Control adaptativo con estimación de parámetros para manejar incertidumbres dinámicas o cinemáticas.
- Control basado en un modelo en el que la pose del robot se obtiene a partir de la información visual y del modelo cinemático del robot.
- Control heurístico que incorpora funciones gaussianas y, así, construye mapeos entre las características de la imagen y las velocidades del robot.
- Navegación basada en visión global, en la que la cámara proporciona información de localización global y guía la trayectoria del robot.



En consonancia, la Tabla 1 presenta las características de cada trabajo revisado, con la intención de mostrar sus diferencias puntuales.

TABLA 1.
Métodos de control para robots móviles que emplean cámaras externas en configuración ojo-a-mano. Fuente: elaboración propia.

REFERENCIA	TIPO DE ROBOT MÓVIL	CONTROLADOR	CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA	TIPO DE RESULTADOS
[11]	No holonómico	No lineal visual adaptado a restricciones no holonómicas para la estabilización de la pose	Sin calibración Orientación paralela y no paralela Profundidad no requerida	Experimentación y simulación
[17]	No holonómico	No lineal visual basado en imagen para la posición	Sin calibración Orientación paralela y no paralela Estimación de profundidad	Experimentación y simulación
[18]	No holonómico	No lineal basado en imagen y control de seguimiento de trayectoria	Sin calibración Orientación paralela y no paralela Estimación de profundidad	Experimentación y simulación
[19]	No holonómico	No lineal, visual y adaptativo basado en imágenes para la posición y la orientación	Sin calibración Orientación paralela Profundidad fija	Experimentación y simulación



REFERENCIA	TIPO DE ROBOT MÓVIL	CONTROLADOR	CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA	TIPO DE RESULTADOS
[20]	No holonómico en forma encadenada	No lineal de estabilización aplicado a la cinemática del robot para regular la posición y la orientación	Sin calibración Orientación paralela Profundidad fija La cámara se emplea únicamente para medir el movimiento del robot	Simulación
[21]	No holonómico	No lineal, visual y adaptativo basado en imagen para la posición y el seguimiento de trayectoria	Sin calibración Orientación paralela Profundidad fija	Experimentación y simulación
[22]	No holonómico	No lineal, visual y adaptativo basado en imagen para la posición y el seguimiento de la trayectoria	Sin calibración Orientación paralela y no paralela	Experimentación y simulación
[23] [24]	No holonómico	No lineal visual basado en grafos y basado en ángulo para regulación de posición y orientación (métodos heurísticos)	Calibración parcial o completa Orientación paralela Profundidad requerida	Experimentación y simulación
[25]	No holonómico	Visual basado en un modelo cinemático para regular la posición y el seguimiento de la trayectoria	Calibración requerida Orientación no paralela Profundidad requerida	Experimentación y simulación
[26]	No holonómico	De guiado basado en un modelo cinemático, con retroalimentación de posición y orientación estimadas visualmente para el seguimiento de la trayectoria	Calibración requerida Una cámara con orientación paralela y otra con orientación no paralela Cámara requerida como sensor de localización global	Experimentación

De la Tabla 1 se observa que los trabajos que implementan la configuración ojo-a-mano corresponden a robots móviles no holonómicos. Es claro que hay numerosos esfuerzos por crear estrategias de control que no requieran la calibración de la cámara; sin embargo, la mayoría de ellos recaen en la suposición y la estimación de los parámetros extrínsecos e intrínsecos. Por otra parte, en los trabajos reportados se aplican principalmente leyes de control visuales y no lineales, por lo que se infiere que este tipo de controladores muestran el mejor desempeño para la configuración ojo-a-mano. En menor cantidad se encuentran los trabajos que emplean el sistema de visión únicamente como sensor, ajeno a la ley de con-



trol. Otro aspecto relevante es que la mayoría de los trabajos presentan resultados experimentales, lo que demuestra la viabilidad de la propuesta de visión en entornos reales más allá de la simulación virtual.

Perspectivas

Los robots móviles captan continuamente el interés de la comunidad científica por su gran versatilidad de aplicaciones, tanto en el ámbito industrial como en labores de apoyo a la población. En el sector industrial, contribuyen a la competitividad de las empresas, factor crucial para su supervivencia en el mercado; por otro lado, en tareas de auxilio se destinan a labores como la búsqueda y el rescate, la inspección de zonas de riesgo y el transporte.

La configuración ojo-a-mano muestra resultados confiables en entornos cerrados donde es posible colocar una cámara externa que observe el espacio de trabajo del robot, lo que permite realizar tareas de localización, seguimiento de trayectoria y control de posición. De esa manera, se disminuye la dependencia de los sensores a bordo, los costos de material y la complejidad de la instrumentación.

En general, los trabajos analizados muestran que la configuración ojo-a-mano se aplica principalmente a robots móviles no holonómicos con ruedas. Los trabajos que relacionan otro tipo de robots móviles con esa configuración escasean debido a las limitaciones del espacio de trabajo, el aspecto físico del robot, la calidad de la visualización de la cámara o el objetivo de movimiento. Es decir, en robots biomiméticos, aéreos y submarinos, es común encontrar la configuración ojo-en-mano, debido a la complejidad de colocar una cámara externa apuntada hacia el robot desde una posición elevada, ya sea móvil o fija.

Por esos motivos, debe intensificarse la investigación en torno a los robots móviles ojo-a-mano, especialmente en el desarrollo de tecnologías que hagan un uso eficiente de la energía, con infraestructura mínima y máxima confiabilidad. En este contexto, el avance tecnológico de los sensores jugará un papel clave junto con el desarrollo de algoritmos de control robustos y adaptativos que compensen las incertidumbres asociadas a la calibración sensorial, la iluminación y la variabilidad del entorno. Además, se esperan integraciones de técnicas modernas de visión por computadora e inteligencia artificial para ampliar el alcance de estos sistemas a escenarios dinámicos, complejos y menos estructurados. Estas líneas de investigación contribuirán a ampliar las ventajas de la configuración ojo-a-mano en aplicaciones más complejas, al mejorar la autonomía, la precisión y la confiabilidad de los robots móviles.



Conclusiones

En la mayoría de los trabajos analizados, además de las cámaras, no se requieren otros sensores para medir o estimar variables del robot, como la posición o la velocidad, lo que representa una oportunidad para reducir los costos de instrumentación. De acuerdo con los resultados, el tipo de robot móvil en configuración ojo-a-mano más estudiado es el no holonómico con ruedas; y las estrategias de control visual predominantes son las no lineales sin calibración, debido a que permiten realizar una implementación flexible al depender menos de la precisión del sistema de visión. Sin embargo, en algunos casos operan bajo supuestos de la profundidad y la orientación de la cámara. Por otro lado, los métodos que requieren la calibración del sistema de visión proporcionan estimaciones más precisas de la posición y la orientación del robot, aunque su despliegue implica una mayor complejidad y dependen de parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara, por lo que son susceptibles a los cambios en las condiciones del entorno.

Finalmente, la configuración ojo-a-mano es una alternativa prometedora para el control de robots móviles en entornos estructurados, especialmente cuando la minimización de sensores a bordo es una prioridad. No obstante, hay desafíos persistentes en la robustez ante perturbaciones visuales y la adaptación a cambios en el entorno. Bajo esta premisa, las investigaciones futuras pueden orientarse al desarrollo de estrategias de control robustas y adaptativas de esta configuración que amplíen la aplicabilidad en escenarios reales complejos.

Referencias

- [1] C. Okonkwo y I. Awolusi, "Environmental sensing in autonomous construction robots: Applicable technologies and systems", *Automation in Construction*, vol. 172, art. 106075, 2025, DOI: [10.1016/j.autcon.2025.106075](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106075)
- [2] D. Zhang, Y. Jiang, J. Liu, G. Xiong, y S. Zou, "Design, protection, perception and planning of mobile robots in nuclear power plants", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 186, art. 105821, 2025, DOI: [10.1016/j.pnucene.2025.105821](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105821)
- [3] P.-C. Shih, Y.-C. Chiang, J.-J. Hu, K.-T. Lin y L.-C. Fu, "Autonomous exploration of mobile robot equipped with LiDAR for high-quality reconstruction in large-scale indoor environments", *Mechatronics*, vol. 112, art. 103409, 2025, DOI: [10.1016/j.mechatronics.2025.103409](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2025.103409)
- [4] D. Li, D. Tang, Ci. Liu, Z. Zhang, y L. Wang, "Research on dynamic obstacle avoidance for industrial AGVs using decay model-based multi-objective Q-learning", *Knowledge-Based Systems*, vol. 333, art. 115000, 2026, DOI: [10.1016/j.knosys.2025.115000](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.115000)
- [5] F. Driewer, M. Sauer, y K. Schilling, "Mixed reality for teleoperation of mobile robots in search and rescue scenarios", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, núm. 3, pp. 267-272, 2006, DOI: [10.3182/20060517-3-FR-2903.00148](https://doi.org/10.3182/20060517-3-FR-2903.00148)
- [6] B. Siciliano y O. Khatib, Eds., *Springer Handbook of Robotics*, Nueva York: Springer, 2016.
- [7] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, y D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, Massachusetts: The MIT Press, 2011.



- [8] W. Lei, C. Zhang, Z. Jin, y J. Chen, "A review on magnetic-assisted localization for mobile robots", *Measurement*, vol. 246, art. 116643, 2025, DOI: [10.1016/j.measurement.2025.116643](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116643)
- [9] P. Kumar Panigrahi y S. Kishoro Bisoy, "Localization strategies for autonomous mobile robots: A review", *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, núm. 8, pp. 6019-6039, 2022, DOI: [10.1016/j.jksuci.2021.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.02.015)
- [10] A. S. Silva Oliveria, M. Carvalho dos Reis, F. A. Xavier da Mota, M. E. Marciano Martinez, y A. Ripardo Alexandria, "New trends on computer vision applied to mobile robot localization", *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 2, pp. 63-69, 2022, DOI: [10.1016/j.iotcps.2022.05.002](https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2022.05.002)
- [11] X. Liang, H. Wang, Y.-H. Liu, Z. Liu, B. You, Z. Jing, y W. Chen, "Pure Image-Based Pose Stabilization of Nonholonomic Mobile Robots with a Truly Uncalibrated Overhead Camera", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, núm. 3, pp. 724-742, 2020, DOI: [10.1109/TRO.2019.2961052](https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2961052)
- [12] S. Wang y N. Syazreen Ahmad, "AI-based approaches for improving autonomous mobile robot localization in indoor environments: A comprehensive review", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 63, art. 101977, 2025, DOI: [10.1016/j.jestch.2025.101977](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101977)
- [13] A. Loganathan y N. Syazreen Ahmad, "A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 40, art. 101343, 2023, DOI: [10.1016/j.jestch.2023.101343](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101343)
- [14] A. Waga, S. Benhlila, A. Bekri, J. Abdouni, y F. Zahrae Saber, "A survey on autonomous navigation for mobile robots: From traditional techniques to deep learning and large language models", *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 37, art. 198, 2025, DOI: [10.1007/s44443-025-00216-x](https://doi.org/10.1007/s44443-025-00216-x)
- [15] A. Morar *et al.*, "A Comprehensive Survey of Indoor Localization Methods Based on Computer Vision", *Sensors*, vol. 20, núm. 9, art. 2641, 2020, DOI: [10.3390/s20092641](https://doi.org/10.3390/s20092641)
- [16] Y. D. V. Yasuda, L. E. G. Martins, y F. A. M. Cappabianco, "Autonomous Visual Navigation for Mobile Robots: A Systematic Literature Review", *ACM Computing Surveys*, vol. 53, núm. 1, pp. 13-34, 2020, DOI: [10.1145/3368961](https://doi.org/10.1145/3368961)
- [17] X. Liang, H. Wang, Y.-H. Liu, W. Chen, y Z. Jing, "Image-Based Position Control of Mobile Robots with a Completely Unknown Fixed Camera", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 63, núm. 9, pp. 3016-3023, 2018, DOI: [10.1109/TAC.2018.2793458](https://doi.org/10.1109/TAC.2018.2793458)
- [18] X. Liang, H. Wang, Y.-H. Liu, B. You, Z. Liu, y W. Chen, "Calibration-Free Image-Based Trajectory Tracking Control of Mobile Robots with an Overhead Camera", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 17, núm. 2, pp. 933-946, 2020, DOI: [10.1109/TASE.2019.2951714](https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2951714)
- [19] F. Yang y C.-L. Wang, "Adaptive Stabilization for Uncertain Nonholonomic Dynamic Mobile Robots Based on Visual Servoing Feedback", *Acta Automatica Sinica*, vol. 37, núm. 7, pp. 857-864, 2011, DOI: [10.1016/S1874-1029\(11\)60211-5](https://doi.org/10.1016/S1874-1029(11)60211-5)
- [20] Z.-Y. Liang, C.-I. Wang, Z.-H. Do, y Z.-R. Liang, "Robust exponential stabilization of non-holonomic chained systems with unknown parameters", *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, vol. 31, pp. 799-812, DOI: [10.1007/s10255-015-0506-0](https://doi.org/10.1007/s10255-015-0506-0)
- [21] F. Yang y C. Wang, "Adaptive tracking control for uncertain dynamic nonholonomic mobile robots based on visual servoing", *Journal of Control Theory and Applications*, vol. 10, pp. 56-63, 2012, DOI: [10.1007/s11768-012-0075-1](https://doi.org/10.1007/s11768-012-0075-1)
- [22] X. Liang, H. Wang, W. Chen, D. Guo, y T. Liu, "Adaptive Image-Based Trajectory Tracking Control of Wheeled Mobile Robots with an Uncalibrated Fixed Camera", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, núm. 6, pp. 2266-2282, 2015, DOI: [10.1109/TCST.2015.2411627](https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2411627)
- [23] M. Dirik, A. Fatih Kocamaz, y E. Dönmez, "Visual servoing based control methods for nonholonomic mobile robot", *Journal of Engineering Research*, vol. 8, núm. 2, pp. 95-113, 2020, DOI: [10.1016/S2307-1877\(25\)00746-1](https://doi.org/10.1016/S2307-1877(25)00746-1)
- [24] E. Dönmez, A. Fatih Kocamaz y M. Dirik, "A Vision-Based Real-Time Mobile Robot Controller Design Based on Gaussian Function for Indoor Environment", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, pp. 7127-7142, 2018, DOI: [10.1007/s13369-017-2917-0](https://doi.org/10.1007/s13369-017-2917-0)
- [25] A. Zdešar, I. Škrjanc, y G. Klančar, "Visual Trajectory-Tracking Model-Based Control for Mobile Robots", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, núm. 9, 2013, DOI: [10.5772/56757](https://doi.org/10.5772/56757)
- [26] Z. Zheng y Y. Lu, "Research on AGV trackless guidance technology based on the global vision", *Science Progress*, vol. 105, núm. 3, 2022, DOI: [10.1177/003685042211037662](https://doi.org/10.1177/003685042211037662)



Modelado de lentes gravitacionales a través de redes neuronales convolucionales

Modeling of gravitational lenses through convolutional
neural networks

Juan Jordi Ancona Flores*
Alberto Hernández Almada
Octavio Cornejo Pérez

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México.

*jancona16@alumnos.uaq.mx

04

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

J. J. Ancona Flores, A. Hernández Almada, y O. Cornejo Pérez, "Modelado de lentes gravitacionales a través de redes neuronales convolucionales", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm. 16, pp. 54-74, 2026.



Resumen

El presente estudio aborda el modelado de lentes gravitacionales fuertes (SGL) mediante redes neuronales convolucionales (CNN), con el objetivo de mejorar la inferencia de parámetros físicos asociados al modelo elipsoide isotérmico singular (SIE). Las SGL constituyen herramientas fundamentales para investigar la materia oscura y la energía oscura; y del mismo modo, para obtener información acerca de la estructura interna de las galaxias. Pero el volumen creciente de datos astronómicos compromete la eficiencia de los métodos tradicionales de modelado. Se generó un conjunto sintético de 76 396 imágenes de sistemas de lentes galaxia-galaxia, derivadas del catálogo del Telescopio Espacial Chino (CSST) utilizando la paquetería Lenstronomy. El modelo CNN se diseñó a partir de la arquitectura Alex-

Net, incorporando modificaciones como estratos adicionales de convolución y normalización por lotes, con el fin de optimizar la extracción de características y reducir el costo computacional. La red predice cuatro parámetros del modelo SIE: el radio de Einstein (θ_E), la relación axial (f) y las componentes de la elipticidad (ϵ_x , ϵ_y). Los resultados muestran una elevada capacidad predictiva, cuyos coeficientes de determinación R^2 van de 0.95 y 0.97, y los errores relativos promedio entre 2.6 % y 5.1 %. Las imágenes reconstruidas alcanzaron una fidelidad PSNR de hasta 37 dB. Estos hallazgos avalan el potencial de las arquitecturas ligeras de CNN orientadas al modelado automático de lentes gravitacionales en grandes volúmenes de datos astronómicos.

Palabras clave: AlexNet, aprendizaje profundo, lentes gravitacionales fuertes, radio de einstein, reconstrucción de Imágenes, redes neuronales convolucionales.

Abstract

This study addresses the modeling of strong gravitational lenses (SGL) through convolutional neural networks (CNN), aiming to improve the inference of physical parameters associated with the singular isothermal ellipsoid (SIE) model. SGL are essential tools for probing dark matter and dark energy, as well as for obtaining insights into the internal structure of galaxies. However, the increasing volume of astronomical data challenges the efficiency of traditional modeling methods. A synthetic dataset of 76 396 galaxy-galaxy lensing images was generated from the Chinese Space Station Telescope (CSST) catalog using the Lenstronomy package. The CNN model was based on the AlexNet architecture,

with modifications including additional convolutional layers and batch normalization to optimize feature extraction and reduce computational cost. The network predicts four parameters of the SIE model: Einstein radius (θ_E), axis ratio (f), and ellipticity components (ϵ_x , ϵ_y). Results demonstrate high predictive performance, with determination coefficients (R^2) ranging from 0.95 to 0.97 and average relative errors between 2.6% and 5.1%. Furthermore, reconstructed images achieved a fidelity of 37 dB in PSNR. These findings confirm the effectiveness of lightweight CNN architectures for the automatic modeling of gravitational lenses across massive astronomical datasets.

Keywords: AlexNet, deep learning, strong gravitational lenses, Einstein's radio, image reconstruction, convolutional neural networks.



Introducción

Una lente gravitacional es un fenómeno astronómico producido por la curvatura del espacio-tiempo alrededor de un objeto masivo, como una galaxia, un cúmulo de galaxias o un cuásar, cuya influencia gravitacional altera la trayectoria de la luz procedente de cuerpos más distantes. Cuando la masa proyectada, que es la acumulada a lo largo de la línea de visión, dentro de la región característica conocida como *radio de Einstein* alcanza una magnitud suficiente para producir múltiples imágenes, el fenómeno resultante recibe el nombre de *lente gravitacional fuerte* (SGL, por sus siglas en inglés). Más aún, cuando la alineación observador-lente-fuente es perfecta, y la fuente alcanza una masa suficientemente grande, se proyecta una circunferencia completa denominada *anillo de Einstein* [1], [2], [3], [4].

La SGL funciona como un telescopio de alta resolución que permite detectar fuentes difíciles de observar directamente. Además, permite sondear la materia oscura dentro de las regiones centrales de los halos, así como determinar el gradiente del perfil de densidad de masa interna de las galaxias y las restricciones en la densidad de energía oscura dentro del Universo [5], [6]. Gracias a las SGL, los telescopios espaciales Euclid [7], [8], el Gran telescopio VLT [9] y el James Webb [10], [11] ya están proporcionando datos sin precedentes, y se espera que las instalaciones de las próximas generaciones, como el telescopio Simonyi en el Observatorio Vera C. Rubin [12], el Extremely Large Telescope [13], [14] y el Telescopio de la Estación Espacial de China (CSST) [15] capturen en pocos años bases de datos en el orden de 10^5 imágenes [16].

Los catálogos conformados hasta ahora incluyen el Cosmic Lens All-Sky Survey [17], [18], el COSMOS [19] y el Sloan Lens ACS [20], [21]. A partir de estos datos, las técnicas convencionales de modelado de lentes intentan abordar el problema inverso no lineal de reconstruir el brillo de las fuentes de lentes, mientras modelan simultáneamente el potencial gravitacional de las lentes. Sin embargo, el volumen ingente (y creciente) de información recopilada impone un reto para los métodos tradicionales analíticos en cuanto a tiempo y recursos.

Tras la detección de una posible lente, resulta fundamental desarrollar un modelo que represente con precisión la distribución total de la masa proyectada, a fin de mitigar la aparición de falsos positivos. Las técnicas de Cadenas de Markov de Monte Carlo se han implementado para el modelado de estos sistemas; sin embargo, su eficiencia ha decaído con el incremento exponencial en el volumen de datos [22], [23]. Para atenuar este problema, las herramientas de inteligencia artificial, como las redes neuronales convolucionales (CNN), han mostrado éxito en la cla-



sificación de imágenes estelares, consolidándose como la técnica predilecta para la búsqueda e identificación de SGL.

Zhang [24] introdujo estas aplicaciones en 1988, al proponer una CNN bidimensional conocida como *red neuronal artificial invariante*. La utilidad principal de las CNN en la clasificación astronómica inició con la caracterización del espectro en el Sloan Digital Sky Survey [25]. Asimismo, Petrillo *et al.* [26] fueron vanguardia en el uso de un método de clasificación morfológica basado en CNN para identificar SGL del catálogo Kilo Degree. Hezaveh *et al.* [27] mostraron la eficiencia de las CNN en la inferencia de valores paramétricos de modelos de masa a partir de imágenes preprocesadas de SGL en alta resolución.

El equipo Highly Optimized Lensing Investigations of Supernovas, Microlensing Objects, and Kinematics of Ellipticals and Spirals (HOLISMOKES) desarrolló una CNN destinada a modelar imágenes de galaxias a partir de la información extraída de SGL [28] y predecir cinco parámetros del modelo de masa elipsoide isotérmico singular (SIE). Adicionalmente, las redes neuronales bayesianas han permitido extraer información altamente abstracta a partir de imágenes complejas. Esta capacidad se ejemplifica en el trabajo de Ji Won Park *et al.* [29], quienes, mediante retrasos de tiempo de lente simulados, determinaron la constante de Hubble; de modo similar, Pearson *et al.* [30] entrenaron una CNN bayesiana aproximada para predecir los parámetros del perfil de masa.

Más recientemente, la Colaboración Euclid [31] diseñó una red neuronal bayesiana para modelar lentes gravitacionales de forma automática y eficiente. La investigación de Parlange *et al.* [32] se sumerge en modelos de transformadores para detectar SGL a partir de conjuntos de datos de HOLISMOKES VI [33] y SuGOHI X [34], los cuales se espera captar con el telescopio Subaru, que emplea una cámara Hyper Suprime-Cam [35].

El presente estudio muestra los resultados de un examen integral del rendimiento de las CNN en la inferencia de los parámetros físicos asociados con SGL. Este análisis detallado implica comparar el conjunto completo de imágenes en busca de similitudes o discrepancias entre las imágenes simuladas y las modeladas con base en los valores inferidos por la CNN. El conjunto de datos sintético comprende 76 396 imágenes de sistemas simulados de lentes de galaxias derivados del catálogo del CSST y generados en un entorno libre de ruido; se apartaron 70 000 imágenes para el proceso de validación cruzada *k-fold*: en cada pliegue se dedicó el 75 % de las imágenes al entrenamiento y el 25 % a la validación. Las 6396 imágenes restantes se reservaron para fines de prueba.



Para este trabajo se creó un modelo CNN basado en la arquitectura AlexNet [36], debido a que las arquitecturas profundas reales exigen un costo computacional excesivo para el procesamiento de millones de imágenes. Las modificaciones realizadas en la red permiten mantener una arquitectura más ligera en comparación con las actuales, facilitando las inferencias rápidas a un bajo costo computacional. La adición de una capa convolucional al bloque central mejora la profundidad de extracción de datos y mitiga la linealidad. El sistema predice cuatro parámetros del modelo de lente SIE: las componentes de elipticidad del lente (ϵ_x y ϵ_y), la proporción axial (f) y el radio de Einstein (θ_E) (ver Sección 2 para sus definiciones). La capacidad predictiva del modelo se evalúa midiendo el error relativo entre los valores reales e inferidos, junto con otras métricas de evaluación. El objetivo de esta investigación es avanzar la interpretabilidad y eficacia de los métodos de aprendizaje profundo en el modelado de lentes gravitacionales a través del uso de una arquitectura ligera diseñada para procesar volúmenes masivos de datos.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la *Fundamentación teórica* se realiza una breve descripción de los sistemas de lentes gravitacionales fuertes de galaxia-galaxia, así como del trasfondo de las redes neuronales convolucionales. En *Materiales y métodos* se detallan los datos sintéticos utilizados, mostrando los criterios para realizar las simulaciones; también se introduce la arquitectura específica del modelo modificado de CNN. El apartado de *Resultados* muestra las inferencias generadas por el modelo, así como un análisis de los errores relativos. Por último, se exponen las conclusiones derivadas de las pruebas realizadas con el modelo de CNN, así como las recomendaciones y propuestas para futuros trabajos.

Fundamentación teórica

Ecuación de la lente

En la Figura 1 se observa un esquema representativo de un sistema conformado por una concentración de masa (llamada *lente gravitacional*) localizada a una distancia DL del observador, la cual desvía los rayos de luz provenientes de una fuente ubicada a una distancia DS respecto al observador, asimismo, la distancia entre la fuente y la lente se denota por DLS . En este trabajo se adopta el paradigma de la *pantalla delgada*, es decir, se asume que las dimensiones tanto de la fuente como de la lente y el observador son despreciables comparadas con las distancias que los separan [1]; esto nos permite localizar a la lente



y a la fuente en espacios bidimensionales paralelos, llamados respectivamente *plano de la fuente* y *plano de la lente*. Entonces, un haz de luz emitido desde una ubicación en el plano de la fuente $\vec{\eta} = \beta \vec{D}_S$ se desvía en un ángulo $\vec{\alpha}$ en la posición $\vec{\xi} = \vec{\theta} D_L$ al atravesar el plano de la lente, donde $\vec{\xi}$ denota la distancia de dicha posición a la lente (ver Figura 1 para las definiciones de $\vec{\beta}$ y $\vec{\theta}$). Como resultado de esta desviación, el observador percibe imágenes de la fuente en las posiciones angulares aparentes $\vec{\theta}_i$ (el índice i designa cada imagen individual). La ecuación de la lente relaciona los ángulos $\vec{\theta}$, $\vec{\beta}$ y $\vec{\alpha}$ con las distancias D_L , D_S y D_{LS} como se expresa a continuación:

$$\vec{\theta} D_S = \vec{\beta} D_S + \vec{\alpha} D_{LS} \quad (1)$$

Para simplificar la ecuación, se define el ángulo de desviación reducido:

$$\vec{\alpha}(\vec{\theta}) = \frac{D_{LS}}{D_S} \vec{\alpha} \quad (2)$$

Simplificando la ecuación de la lente:

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta}) \quad (3)$$

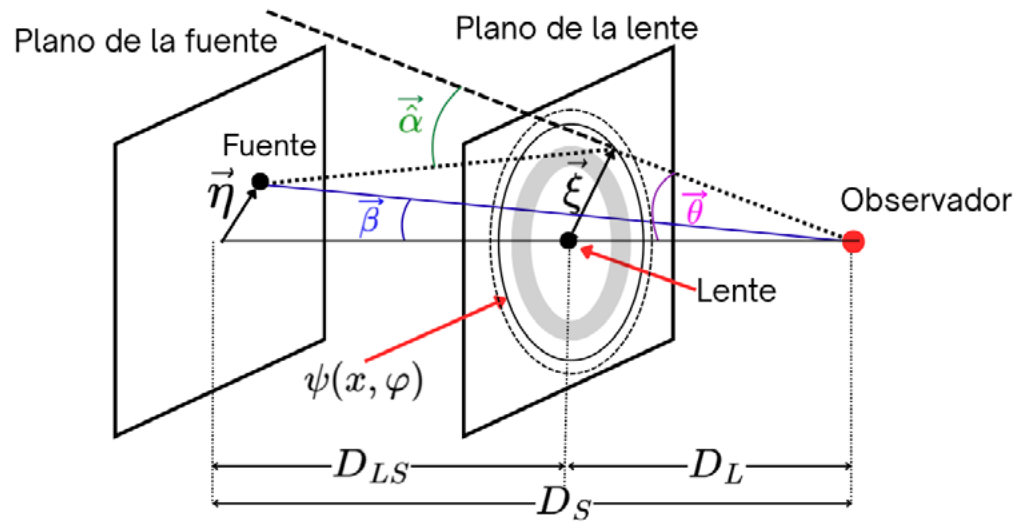


FIGURA 1.
Esquema de un sistema de lente gravitacional. Fuente: adaptado de [37].

Modelo elipsoide isotérmico singular (SIE)

La modelación realista de lentes gravitacionales generadas por los sistemas galaxia-galaxia requiere calcular las distribuciones de masa definidas por contornos de densidad elíptica. Esta investigación se centra en la densidad de superficie según el modelo SIE, predominante en el estudio de lentes gravitacionales fuertes a escala galáctica porque proporciona una descripción efectiva de la distribución total de masa proyectada en el plano de la lente. Es decir, permite representar de manera realista y con simplicidad computacional la



morfología de las galaxias que constituyen una SGL [1], [2], [3], [4], [5], [38]. El modelo SIE puede entenderse como una refinación del modelo esférico isotérmico singular (SIS), que asume simetría esférica y una distribución de velocidad isotérmica. En el modelo SIS, la densidad de masa ($\Sigma_{SIS}(\xi)$) en el plano de la lente está dada por:

$$\Sigma_{SIS}(\xi) = \frac{\sigma_v^2}{2G\xi} \quad (4)$$

donde σ_v^2 representa la velocidad de dispersión de la galaxia lente y ξ es la distancia desde el centro de la lente hasta la posición en el plano de la lente donde ocurre la desviación de la luz (Figura 1).

Para generar las variaciones en la densidad de masa con respecto a la simetría esférica, el SIE introduce elipticidad en la distribución de la masa proyectada, reemplazando la coordenada radial circular en el plano de la lente por una elíptica. Siguiendo [38], esto se logra con la transformación:

$$\xi \rightarrow \sqrt{\xi_1^2 + f^2 \xi_2^2} \quad (5)$$

donde ξ_1 y ξ_2 son las coordenadas de la posición de la fuente en el plano de la lente y f denota la relación axial de la elipse, definida en $0 < f \leq 1$ [39]. Bajo esta premisa, el perfil de densidad de masa para el modelo SIE es:

$$\Sigma_{SIE}(\xi) = \frac{\sigma_v^2}{2G\xi} \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{\xi_1^2 + f^2 \xi_2^2}} \quad (6)$$

El potencial gravitacional asociado a la Ecuación (6) se expresa en coordenadas polares como:

$$\psi(x, \varphi) = \frac{\sqrt{fx}}{f'} \left[\sin(\varphi) \arcsin(f' \sin \varphi) + \cos(\varphi) \sinh^{-1}\left(\frac{f'}{f} \cos \varphi\right) \right] \quad (7)$$

Donde:

φ ángulo de posición medido entre el semieje mayor de la elipse de masa de la lente y el eje x del plano de la lente

$$f' = \sqrt{1 - f^2}$$

$$\vec{x} = \vec{\xi}/\xi_0$$

ξ_0 longitud de escala característica de la lente

$$x = |\vec{x}|$$

La relación entre este potencial y el ángulo de deflexión está dada por:

$$\vec{\alpha} = \nabla \psi \quad (8)$$



Cuando existe alineación entre la fuente, la lente y el observador, se obtiene un efecto conocido como *anillo de Einstein*; su radio, conocido como *ángulo de Einstein*, está definido por:

$$\theta_E = 4\pi \frac{\sigma_v^2}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S} \quad (9)$$

donde c denota la velocidad de la luz [38]. Finalmente, la elipticidad está típicamente parametrizada en función de φ como:

$$\varepsilon_x = \frac{1-f}{1+f} \cos(2\varphi) \quad (10)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1-f}{1+f} \sin(2\varphi) \quad (11)$$

Ambas componentes están definidas en el intervalo $[-1,1]$.

Redes neuronales convolucionales

Yann LeCun [39] fue pionero en la aplicación efectiva del método de retropropagación para CNN dirigidas al reconocimiento de código escrito a mano, asignando al proceso el término *convolución*. Las CNN representan una evolución de los modelos *feedforward* estándar, y sirven para identificar jerarquías de características mediante mecanismos evolutivos que reducen el costo computacional. Frente a las redes convencionales, las CNN ofrecen ventajas porque optimizan la convergencia al procesar la información de entrada: limitan la conexión de cada capa neuronal a subgrupos específicos de la capa previa y disminuyen la carga de parámetros mediante la gestión del peso, la reducción de dimensionalidad o el *downsampling*.

Una arquitectura CNN típica posee cuatro componentes principales: capas convolucionales, capas de agrupamiento (*pooling*), funciones de activación y capas totalmente conectadas (*fully connected*), como se muestra en la Figura 2. Las capas convolucionales aplican filtros en los datos de entrada para identificar patrones. Las capas de agrupación realizan un muestreo descendente a lo largo de dimensiones espaciales, simplificando así las cargas de parámetros en el proceso de activación; su función principal es reducir las dimensiones espaciales de los mapas de activación sin omitir las características críticas, lo que reduce las demandas computacionales, controla el sobreajuste y logra representaciones invariantes de traducciones pequeñas. Las funciones de activación son indispensables para la expresión de características complejas y actúan de manera similar al modelo neuronal humano al determinar qué información se propaga a cada neurona sucesora; entre funciones de activación se utiliza predominantemente la unidad lineal rectificada (ReLU) [39], que ayuda al mo-



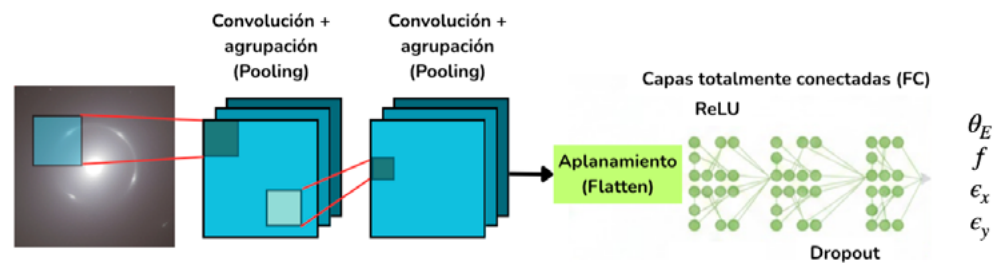
delo a discernir patrones no lineales de imagen. La función ReLU se escribe como:

$$\text{ReLU}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq 0 \\ x & \text{if } x > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Si una entrada x es negativa, su valor de función es 0; si es positiva, su valor se mantiene intacto.

Además, como en otras redes neuronales, el entrenamiento de CNN requiere algoritmos de aprendizaje automático y regularización; uno de ellos es el *dropout*, que funciona omitiendo neuronas de forma aleatoria para prevenir la coadaptación de detectores de características y reducir el sobreajuste. Esta técnica permite entrenar múltiples configuraciones de red de manera eficiente y en tiempos razonables [40], [41], [42], [43]. Normalmente, la tasa de selección del *dropout* está entre el 20 y 50 %.

FIGURA 2. Arquitectura ilustrativa de un modelo de CNN. Fuente: elaboración propia.



Materiales y métodos

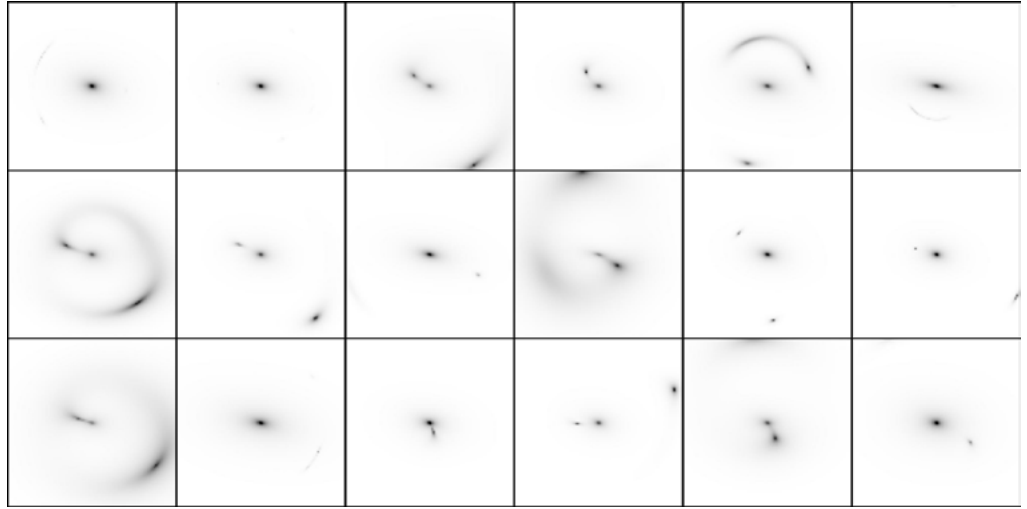
Base de datos simulada del catálogo CSST

El conjunto de datos utilizado para entrenar, validar y probar el modelo CNN consta de 76 396 imágenes de 100×100 píxeles, 1 canal de color y resolución angular de 0.06 segundos de arco/píxel, generadas según las configuraciones de sistemas de lentes fuertes reportadas y validadas por el telescopio espacial CSST [15]. Dicha muestra corresponde a las capturas que se esperarían en barridos angulares amplios del cielo en exposiciones individuales.

La Figura 3 muestra varios ejemplos aleatorios de imágenes sintéticas utilizadas en el análisis. Las imágenes se generaron mediante el paquete Lenstronomy, en el entorno Python (3.11.10), que modela el perfil de luminosidad de la fuente mediante el método de Sérsic [44]. S. Mukherjee *et al.* [45] determinaron que la selección meticulosa de los parámetros de origen para el modelado de lentes posee una relevancia limitada, y no introduce sesgos sustanciales en el proce-



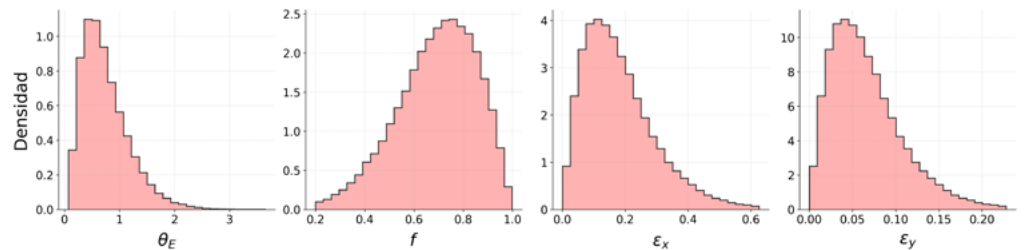
FIGURA 3.
Ejemplos aleatorios
de imágenes sintéticas
de sistemas de lentes
galaxia-galaxia
utilizados en el
entrenamiento.
Fuente: elaboración
propia.



Como se exhibe en las Ecuaciones 9 y 10, las componentes de elipticidad se calcularon en función de la proporción axial de las configuraciones de la muestra de CSST [15]. Para este trabajo, el ángulo de posición utilizado para calcular las componentes de elipticidad para la lente ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$) se estableció arbitrariamente en 10° relativo al norte, mientras que el ángulo de posición para computar las componentes de elipticidad de la fuente se extrajo directamente de la muestra.

La distribución de masa de la lente se caracteriza por medio del modelo SIE; y las distribuciones de brillo con el modelo Sérsic a $n_s = 4$. La Figura 4 muestra la distribución paramétrica SIE de la base de datos del CSST. Los registros de θ_E cubren una región entre $[0.07, 3.65]$. Para f , los valores se encuentran entre $[0.2, 1.0]$. Las componentes de elipticidad ε_x y ε_y cubren los intervalos $[0.0, 0.6]$ y $[0.0, 0.2]$, respectivamente.

FIGURA 4.
Distribuciones
de los datos de los 4
parámetros. Fuente:
elaboración propia.



Modelo de CNN

El objetivo principal es entrenar una CNN modificada a partir de AlexNet para predecir los cuatro parámetros característicos del modelo SIE ($\theta_E, f, \varepsilon_x, \varepsilon_y$) en

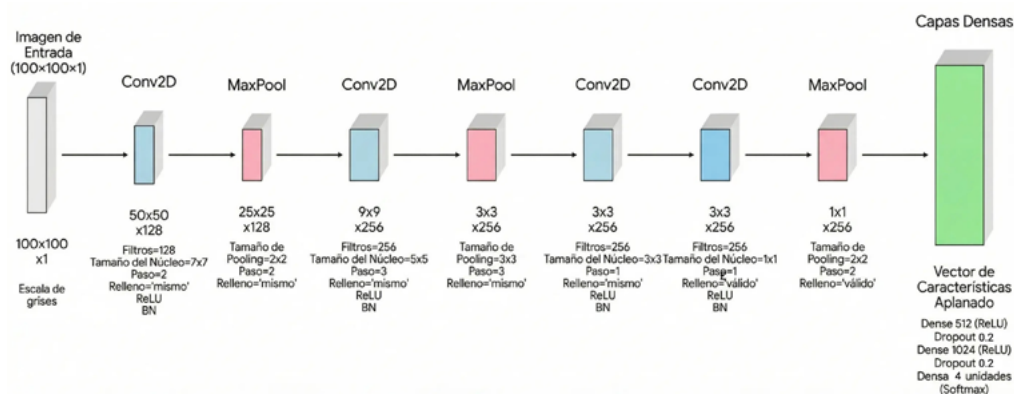


el modelado de lentes gravitacionales. Como se indicó previamente, el conjunto de datos se subdividió en 70 000 imágenes para efectuar un esquema *k-fold* de cuatro iteraciones: 75 % de las imágenes se destinaron al entrenamiento y 25 % a la validación; las 6396 imágenes restantes se reservaron para poner a prueba la capacidad predictiva de la CNN tras el entrenamiento.

Un elemento crucial del conjunto de datos es el formato binario TFRecords optimizado con TensorFlow para almacenar imágenes. Este formato es ideal para grandes conjuntos de datos, ya que permite un almacenamiento compacto y acelera la lectura de datos durante el entrenamiento del modelo, incluso si los registros no caben completamente en la memoria. Asimismo, facilita el etiquetado y la organización sistemática de las imágenes, lo que permite que un solo archivo se divida en muestras de entrenamiento, validación y prueba. Además, el soporte del formato para imágenes en escala de grises agiliza los procedimientos de preprocesamiento.

AlexNet fue introducida por Alex Krizhevskii *et al.* en 2012 y ganó el Desafío de Reconocimiento Visual a Gran Escala de ImageNet de 2012, competencia en la cual se evaluó el rendimiento de algoritmos en detección de objetos y categorización de imágenes. Esta arquitectura logró una tasa de error del 15.3 % en la clasificación de imágenes a gran escala, al ampliar los conceptos fundamentales de LeNet y aplicar los principios básicos de las CNN a una red más extensa y profunda. El sistema integra la función de activación ReLU, el *dropout* y la normalización de respuesta local (LRN) por primera vez dentro de una CNN. El modelo de CNN implementado en esta investigación incorpora modificaciones en AlexNet tanto en el número de capas como de neuronas. En la Figura 5, los bloques de convolución están indicados por el color azul, los de agrupamiento por el color rosa, y las capas densas está representada por el bloque verde.

FIGURA 5.
Esquema de la CNN
utilizada en este
trabajo. Fuente:
elaboración propia.



El modelo comprende seis bloques que preceden a las capas completamente conectadas. Los bloques iniciales consisten en una capa convolucional, seguida de la normalización por lotes y las capas de agrupación máxima. La prime-



ra capa convolucional aplica 128 filtros de tamaño 7×7 con una zancada de 2, reduciendo así la resolución espacial. La segunda capa convolucional utiliza 256 filtros de tamaño 5×5 con una zancada de 3, facilitando la extracción de características a escala media. El bloque convolucional profundo, que consiste en cuatro capas convolucionales con 256 filtros de tamaño 1×1 , captura representaciones jerárquicas y mejora la profundidad de la red sin aumentar considerablemente el número de parámetros. Este bloque concluye con una capa *max-pooling* para reducir aún más la dimensionalidad espacial. Los mapas de características aplanados son procesados por dos capas densas que consisten en 512 y 1024 neuronas, respectivamente. En última instancia, el modelo concluye con una capa densa que posee activación lineal y que produce los cuatro resultados correspondientes a los parámetros de interés.

La mejora primordial que presenta el modelo utilizado en este trabajo son las capas *BatchNormalization*, que estabilizan el entrenamiento, permiten tasas de aprendizaje más altas y reducen la sensibilidad a la inicialización. Otra ventaja es la inclusión de una capa convolucional adicional que mejora la capacidad del modelo para extraer detalles de las imágenes. Además, al implementar la factorización del filtro dentro del bloque de capa convolucional 1×1 se representan mejor las características sin elevar el costo computacional.

Debido a que las componentes de elipticidad producen variaciones más débiles en las imágenes que otros parámetros del modelo de lente, la red tendía a subajustarlas. Para mitigar este efecto, se aplicó un esquema de ponderación en la función de pérdida para asignar pesos más altos a los términos asociados con ε_x y ε_y ; se trató de un proceso iterativo de ajuste empírico según la contribución de cada componente al fenómeno, evaluando su efecto sobre la convergencia del modelo y el error de predicción en el conjunto de validación. En específico, los pesos para el radio de Einstein y la relación del eje se definieron en 1.0, y para las componentes de elipticidad en 3.0, respectivamente; de esa manera, la influencia de estos parámetros sobre el gradiente fue más fuerte durante el entrenamiento, estimulando la sensibilidad del modelo a las particularidades de las firmas morfológicas.

Para el refinamiento del peso se utilizó el NAdam, una adaptación del optimizador Adam, que incorpora a su vez el impulso Nesterov. El gradiente acelerado de Nesterov (NAG) es una técnica de optimización de primer orden que en ciertos contextos eleva y acelera la tasa de convergencia respecto del método tradicional de descenso de gradiente estocástico (SGD), y fomenta la precisión para minimizar la función de pérdida. El NAG se distingue del SDG porque da pri-



mero un paso sustancial en la dirección del gradiente acumulado, y luego evalúa la posición terminal del gradiente para realizar los ajustes necesarios.

En cuanto a la mitigación del sobreajuste, se integró en el modelo un *callback* de *ReduceLROnPlateau* para regular sistemáticamente la tasa de aprendizaje y refinar así las métricas de entrenamiento. En este trabajo, el factor λ para *ReduceLROnPlateau* se fijó en 0.5. La tasa de aprendizaje ϵ mínima elegida fue 10^{-8} . Por último, se evaluó el rendimiento del modelo con base en las 6396 imágenes reservadas para este fin.

Métricas de evaluación

Para evaluar y comparar el rendimiento del modelo de manera cuantitativa, se seleccionó el error cuadrático medio ponderado (WMSE) como función de pérdida, mientras que, como métrica de evaluación, sirvió el error absoluto medio (MAE). Como se mencionó anteriormente, los pesos para el radio de Einstein y la relación axial se establecieron en 1.0, y respecto a las componentes de elipticidad de la lente en 3.0, siguiendo el enfoque de aprendizaje multitarea propuesto por Caruana [46]. Cabe mencionar que se asignó un mayor peso a las componentes de la elipticidad en la función de pérdida debido a la alta complejidad asociada a su inferencia, derivada de las degeneraciones existentes entre estos parámetros y la relación axial (f). El valor de 3.0 fue seleccionado empíricamente mediante un proceso iterativo, porque mostró el mejor desempeño predictivo global durante la validación del modelo. Además, se calculó para cada parámetro el coeficiente de determinación R^2 , que indica en qué medida la varianza en los valores observados puede explicarse por las inferencias del modelo. Estas métricas se exponen en las siguientes expresiones,

$$WMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k w_j (y_{i,j} - \hat{y}_{i,j})^2 \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k |y_{i,j} - \hat{y}_{i,j}| \quad (14)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

Donde:

y_i el valor inferido actual

$\hat{y}_i$ el valor real actual

$\bar{y}$ la media de los valores reales

Σ_j la suma sobre el número de parámetros



El error relativo ϵ_r de cada valor inferido y refiere a la divergencia proporcional de éste respecto del valor real $\hat{y}$. La Ecuación 16 ilustra la expresión correspondiente a dicho cálculo:

$$\epsilon_r = \left| \frac{\hat{y} - y}{\hat{y}} \right| \quad (16)$$

Asimismo, para medir la desviación y precisión de las imágenes se calcula el sesgo entre los valores inferidos respecto de los originales mediante la siguiente métrica:

$$\mu = \text{mediana}(\vec{\hat{y}} - \vec{y}) \quad (17)$$

Donde:

$\vec{\hat{y}}$ vector de los valores inferidos

$\vec{y}$ vector de los valores originales

Adicionalmente, para reforzar los hallazgos es crucial un análisis comparativo entre imágenes simuladas a partir de los resultados del modelo CNN y las imágenes de referencia, usando métricas objetivas como la proporción máxima de señal a ruido (PSNR) y el error cuadrático medio (MSE). La PSNR se expresa en decibeles: una reconstrucción de las imágenes se considera buena en el rango de 30 a 40 dB. Para una imagen de referencia X y una de prueba Y de tamaños $M \times N$, la proporción de ruido se calcula mediante:

$$PSNR(X, Y) = 10 \log_{10} (MAX_{img}^2 / MSE_{img}(X, Y)) \quad (18)$$

Donde:

$$MSE_{img} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij} - Y_{ij})^2 \quad (19)$$

MAX_{img} = valor máximo que un píxel puede tener en la imagen

Como complemento, se calculó el índice de similitud estructural (SSIM), que mide la semejanza perceptiva en función de las diferencias estructurales entre una imagen original y una imagen reconstruida; se calcula como una combinación de la luminancia (l), el contraste (c) y la estructura (s) [47]:

$$SSIM(X, Y) = f(l(X, Y), c(X, Y), s(X, Y)) \quad (20)$$

Un SSIM de 1.0 indica un nivel de fidelidad óptimo, mientras que los procesos de reconstrucción cuyo SSIM tiende asintóticamente a 0 se consideran deficientes.



Resultados

Esta sección está dedicada a analizar el rendimiento del modelo CNN en la inferencia de cuatro parámetros del modelo SIE. Se observó que los resultados reportados corresponden a los valores promedio obtenidos de un procedimiento de validación cruzada que emplea un esquema de partición de 4 pliegues. Específicamente, la muestra de prueba de 6396 imágenes se dividió en cuatro subconjuntos independientes. La Figura 6 ilustra la evolución de las funciones de pérdida y MAE con respecto a cada iteración del modelo de entrenamiento, para las cuales se aprecia un comportamiento consistente. La Tabla 1 resume los resultados que se discuten en esta sección.

FIGURA 6.
Métricas empleadas en el entrenamiento y validación del modelo.
Fuente: elaboración propia.

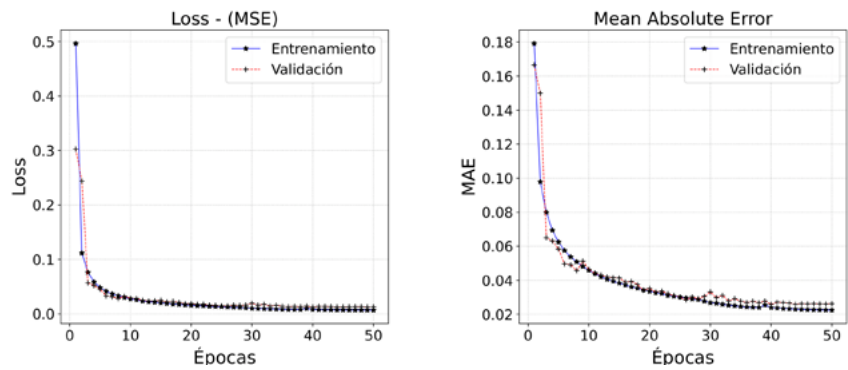


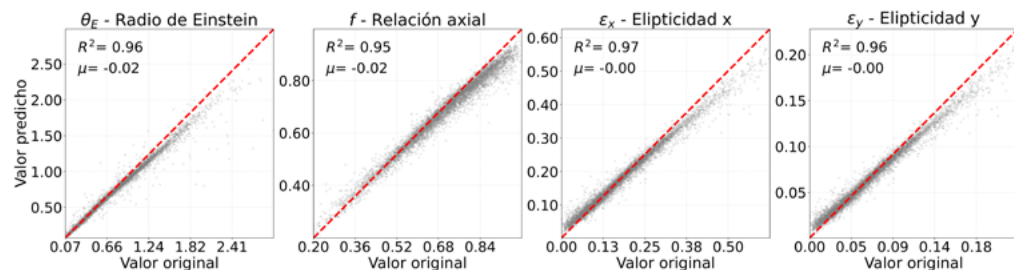
TABLA 1.
Resultados del coeficiente de determinación del error relativo de cada parámetro para cada modelo.

MÉTRICAS		f		f		ϵ_y		ϵ_y	
Loss	MAE	R^2	R^2 (%)	R^2	ϵ_r (%)	ϵ_r	ϵ_r (%)	ϵ_r	ϵ_r (%)
0.006	0.022	0.96	4.00	0.95	2.44	0.97	4.86	0.96	5.11

Las distribuciones de dispersión entre los parámetros SIE verdaderos e inferidos (Figura 7) muestran una fuerte tendencia a la relación uno a uno. Las inferencias son más precisas a valores más bajos del radio de Einstein, mientras que se hace evidente un sesgo sistemático para $\theta_E \gtrsim 1.2$, consistente con la distribución de las muestras de entrenamiento. Se observa una tendencia similar para el parámetro de relación de ejes f , donde el modelo subestima sistemáticamente los valores por encima de $f \gtrsim 0.8$. Y las componentes de elipticidad ϵ_x y ϵ_y exhiben un sesgo creciente a valores altos, particularmente cuando superan 0.4 y 0.12, respectivamente.


FIGURA 7.

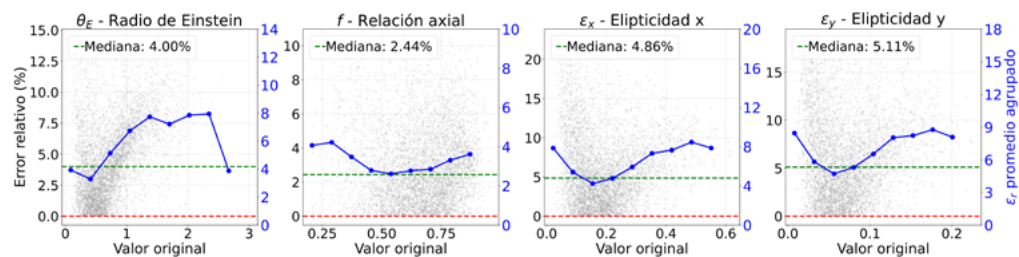
Valores inferidos frente a valores originales para los parámetros de lentes estimados. Fuente: elaboración propia.



Estas diferencias se pueden apreciar en la Figura 8, donde se agrega el MAE agrupado para visualizar con mayor detalle el patrón de los residuos. Los errores relativos de los parámetros SIE se presentan en la Figura 9. El error relativo medio más bajo se obtiene para el parámetro f , con valores de alrededor del 2.6 %, mientras que los parámetros de elipticidad muestran las tasas más altas, alcanzando valores relativos medios de hasta el 5.1 %. En general, el modelo logra una alta capacidad predictiva para los parámetros SIE, con R^2 en el rango de 0.95 a 0.97.

FIGURA 8.

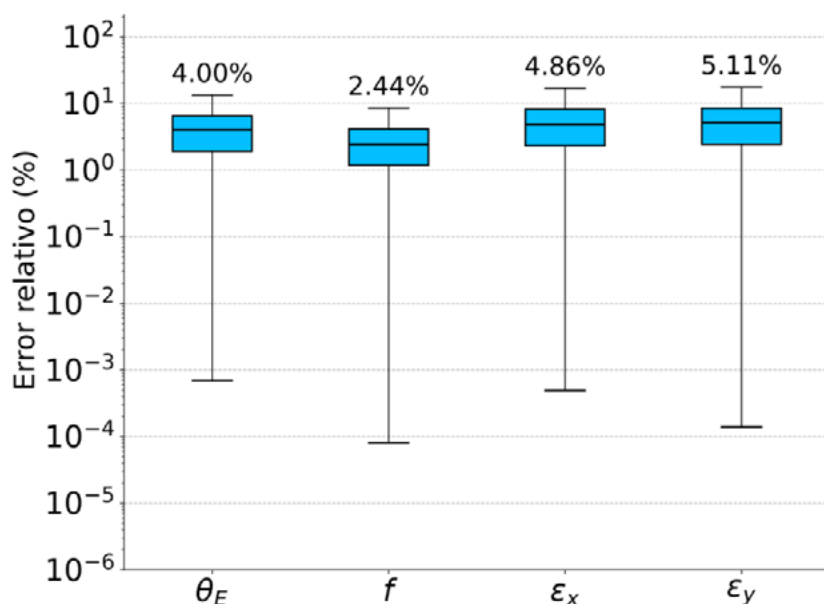
Valores originales frente al error relativo para los parámetros de lentes estimados. Fuente: elaboración propia.



En cuanto a la PSNR, las imágenes de origen reconstruidas exhiben un promedio de aproximadamente 37 dB, es decir, dentro del rango de alta fidelidad de reconstrucción.

FIGURA 9.

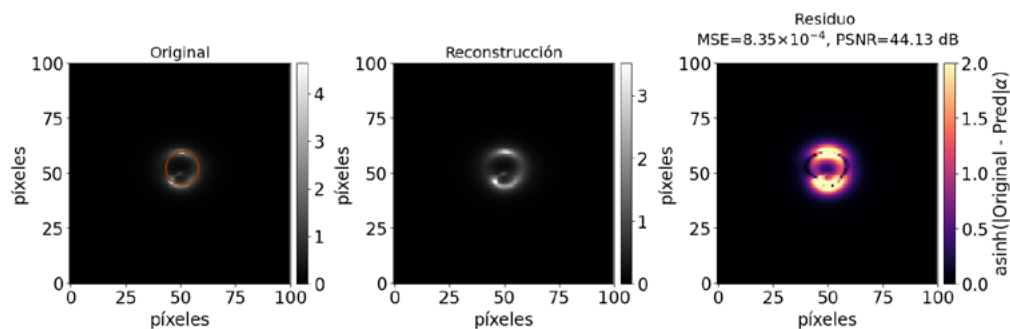
Errores relativos porcentuales por cada parámetro. En la parte superior de las cajas se muestra la mediana de los errores. Fuente: elaboración propia.





Un ejemplo de un sistema de lente galaxia-galaxia reconstruido se muestra en la Figura 10, en la cual la imagen reconstruida coincide estrechamente con la verdadera fuente, con una PSNR de 44.13 dB. Los residuos correspondientes, definidos como la diferencia entre las imágenes verdaderas y reconstruidas, muestran una intensidad muy baja.

FIGURA 10.
Ejemplo aleatorio de un sistema de lente gravitacional fuerte galaxia-galaxia.
Fuente: elaboración propia.



Para mejorar la visibilidad de las características débiles y brillantes, se aplica una transformación asinh de Lupton a los mapas residuales. En la Figura 11 se presentan tres ejemplos representativos de reconstrucciones de SGL, cuyos SSIM próximos a la unidad ratifican la fidelidad de las reconstrucciones respecto de las observaciones originales. Además, al extender la evaluación del SSIM a la totalidad del conjunto de prueba, se obtuvo un valor promedio de 0.99.

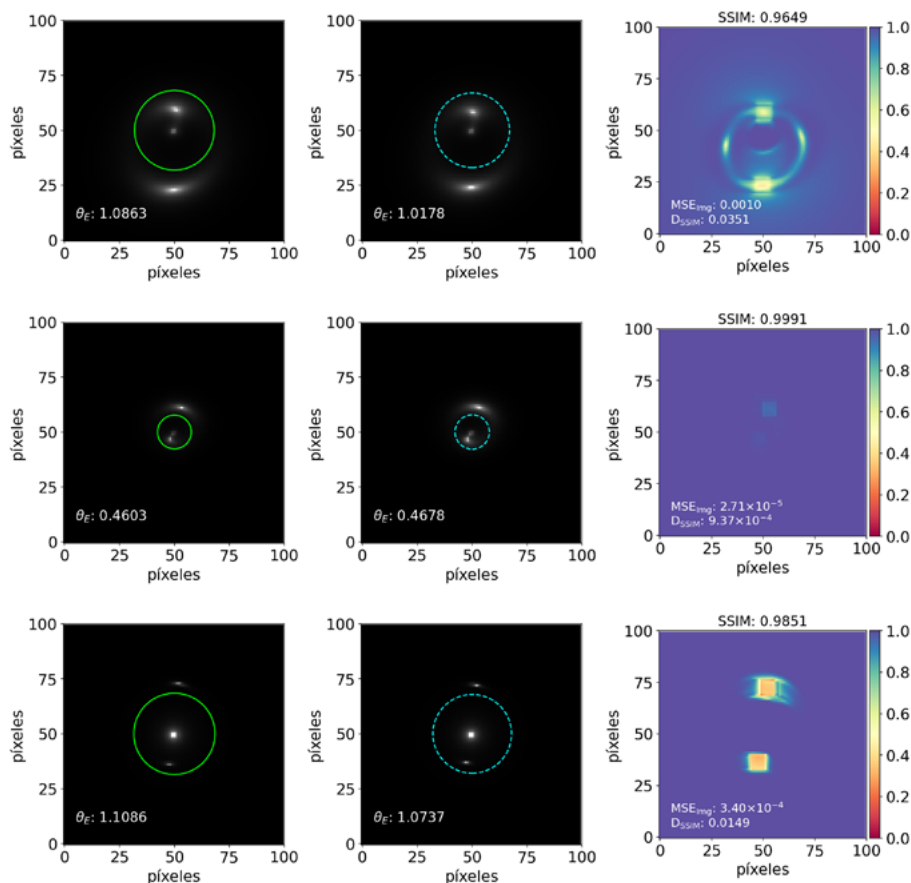


FIGURA 11.
Ejemplos de sistemas reconstruidos de lentes gravitacionales fuertes.
Fuente: elaboración propia.



Discusión y conclusiones

Los resultados muestran que la CNN es capaz de capturar de forma consistente la relación no lineal entre la morfología de los anillos de Einstein y los parámetros morfológicos subyacentes del perfil SIE ($\theta_E, f, \varepsilon_x, \varepsilon_y$). El coeficiente de determinación obtenido para todos los parámetros (R^2 entre 0.95 y 0.97) muestra una elevada capacidad predictiva del modelo, incluso utilizando una arquitectura relativamente ligera en comparación con enfoques más pesados reportados en la literatura.

En particular, el parámetro de relación axial f presentó el menor error relativo promedio ($\sim 2.44\%$), lo cual sugiere que las capas convolucionales capturan con mayor precisión las deformaciones globales asociadas a la elongación de la distribución de masa. Esto puede atribuirse a que dicho parámetro induce cambios geométricos macroscópicos en la forma del anillo, facilitando su extracción a partir de filtros espaciales. Por otro lado, las componentes de elipticidad ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$) exhibieron errores relativos mayores ($\sim 5.11\%$), indicando que las variaciones anisotrópicas representan un desafío de mayor envergadura para la red cuando son más sutiles.

El análisis de dispersión entre valores reales e inferidos revela sesgos sistemáticos en regiones específicas del espacio paramétrico, posiblemente a causa de la distribución no uniforme del conjunto de entrenamiento y la incapacidad de generalización a partir de valores menos representados. Puesto de otro modo, la red neuronal presenta un mejor desempeño en los rangos más densamente muestreados de los parámetros, mientras que en regiones menos representadas las predicciones se dispersan, y surge una ligera tendencia a subestimar los valores extremos. En particular, este fenómeno fue más evidente para radios de Einstein superiores a 1.2 y proporciones de elipticidad mayores de 0.8. La incorporación del esquema de ponderación en la función de pérdida WMSE demostró ser un elemento clave para equilibrar el aprendizaje multitarea. Al asignar pesos mayores a las componentes de elipticidad, se incrementó la sensibilidad del gradiente respecto a estos parámetros cuya firma física es tenue.

Respecto a la fidelidad de reconstrucción de imágenes, el PSNR promedio de aproximadamente 37 dB, junto con ejemplos individuales que alcanzan 44.13 dB, indica que las imágenes reconstruidas simulan adecuadamente la intensidad y distribución global del brillo. Por otro lado, la similitud estructural observada sugiere que la red replica fielmente los parámetros numéricos conservando la geometría de las curvas críticas proyectadas en el plano de imagen. Este resultado es importante porque, en sistemas de lentes gravitacionales, pequeñas



variaciones en parámetros como la elipticidad o el radio de Einstein producen deformaciones coherentes en la morfología de los arcos. En este contexto, un SSIM promedio de 0.99 avala la capacidad del modelo para aprender a relacionar consistentemente la distribución de masa con la formación de imágenes, más allá de una simple aproximación estadística basada en regresión.

En conclusión, las CNN constituyen una herramienta robusta y escalable para el modelado de SGL. La arquitectura compacta propuesta permitió inferir con alta precisión los parámetros del modelo SIE, alcanzando errores relativos entre 2.44 y 5.11 % bajo condiciones ideales a bajo costo computacional durante entrenamiento e inferencia. Estos resultados constituyen un punto de partida y referencia para evitar de manera sistemática que, en trabajos futuros, se degrade la precisión al incorporar parámetros adicionales, como el ruido instrumental, el fondo astronómico, el *shear* externo o incluso perfiles de densidad como el Navarro-Frenk-White, correspondiente a la materia oscura [48]. Finalmente, la integración de funciones de pérdida informadas por la física puede mejorar la interpretabilidad y permitir que el modelo, además de ajustar parámetros observacionales, respete directamente las leyes físicas que gobiernan el fenómeno de las lentes gravitacionales.

Referencias

- [1] P. Schneider, C. Kochanek, y J. Wambsganss, *Gravitational Lensing: Strong, Weak and Micro*. Alemania: Springer, 2006, DOI: [10.1007/978-3-540-30310-7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30310-7)
- [2] P. Schneider, *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*. Alemania: Springer, 2015, DOI: [10.1007/978-3-642-54083-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54083-7)
- [3] Y. D. Hezaveh *et al.*, "Detection of lensing substructure using ALMA observations of the dusty galaxy SDP.81", arXiv:1601.01388, 2016, DOI: [10.48550/arXiv.1601.01388](https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.01388)
- [4] M. Meneghetti, *Introduction to Gravitational Lensing With Python Examples*, Suiza: Springer, 2021, DOI: [10.1007/978-3-030-73582-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73582-1)
- [5] A. J. Shajib *et al.*, "Strong Lensing by Galaxies", *Space Science Reviews*, vol. 220, núm. 87, 2024, DOI: [10.1007/s11214-024-01105-x](https://doi.org/10.1007/s11214-024-01105-x)
- [6] T. Treu, "Strong Lensing by Galaxies", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 48, pp. 87-125, 2010, DOI: [10.1146/annurev-astro-081309-130924](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130924)
- [7] Euclid Collaboration, "Euclid: I. Overview of the Euclid Mission", *Astronomy & Astrophysics*, vol. 697, art. A1, 2025, DOI: [10.1051/0004-6361/202450810](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450810)
- [8] R. Laureijs *et al.*, "Euclid Definition Study Report", arXiv:1110.3193, 2011, DOI: [10.48550/arXiv.1110.3193](https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.3193)
- [9] D. Enard, "The European Southern Observatory Very Large Telescope", *Journal of Optics*, vol. 22, núm. 2, pp. 33-50, 1991, DOI: [10.1088/0150-536X/22/2/001](https://doi.org/10.1088/0150-536X/22/2/001)
- [10] M. W. McElwain *et al.*, "The James Webb Space Telescope Mission: Optical Telescope Element Design, Development, and Performance", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 135, art. 058001, 2023, DOI: [10.1088/1538-3873/acada0](https://doi.org/10.1088/1538-3873/acada0)
- [11] J. P. Gardner *et al.*, "The James Webb Space Telescope", *Space Science Reviews*, vol. 123, pp. 485-606, 2006, DOI: [10.1007/s11214-006-8315-7](https://doi.org/10.1007/s11214-006-8315-7)
- [12] F. B. Bianco *et al.*, "Optimization of the Observing Cadence for the Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time: A Pioneering Process of Community-focused Experimental Design", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 258, núm. 1, 2021, DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac3e72>



- [13] I. Hook, "The Science Case for the European ELT", en *Science with the VLT in the ELT Era*, A. Moorwood, Ed., 2009, pp. 225-232, DOI: [10.1007/978-1-4020-9190-2_38](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9190-2_38)
- [14] E. Palle *et al.*, "Ground-breaking exoplanet science with the ANDES spectrograph at the ELT", *Experimental Astronomy*, vol. 59, núm. 29, 2025, DOI: [10.1007/s10686-025-10000-4](https://doi.org/10.1007/s10686-025-10000-4)
- [15] Y. Gong *et al.*, "Introduction to the Chinese Space Station Survey Telescope (CSST)", *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, vol. 69, art. 239501, 2026, DOI: [10.1007/s11433-025-2809-00](https://doi.org/10.1007/s11433-025-2809-00)
- [16] T. E. Collett, "The Population of Galaxy-Galaxy Strong Lenses in Forthcoming Optical Imaging Surveys", *The Astrophysical Journal*, vol. 811, núm. 1, 2015, DOI: [10.1088/0004-637X/811/1/20](https://doi.org/10.1088/0004-637X/811/1/20)
- [17] S. T. Myers *et al.*, "The Cosmic Lens All-Sky Survey - I. Source selection and observations", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 341, núm. 1, pp. 1-12, 2003, DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06256.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06256.x)
- [18] I. W. A. Browne *et al.*, "The Cosmic Lens All-Sky Survey - II. Gravitational lens candidate selection and follow-up", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 341, núm. 1, pp. 13-32, 2003, DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06257.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06257.x)
- [19] N. Scoville *et al.*, "The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): Overview", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 172, 2007.
- [20] A. S. Bolton *et al.*, "The Sloan Lens ACS Survey. I. A Large Spectroscopically Selected Sample of Massive Early-Type Lens Galaxies", *The Astrophysical Journal*, vol. 638, núm. 2, pp. 703-724, 2006, DOI: [10.1086/498884](https://doi.org/10.1086/498884)
- [21] A. S. Bolton *et al.*, "The Sloan Lens ACS Survey. V. The Full ACS Strong-Lens Sample", *The Astrophysical Journal*, vol. 682, núm. 2, pp. 964-984, 2008, DOI: [10.1086/589327](https://doi.org/10.1086/589327)
- [22] F. Sciortino *et al.*, "Inference of experimental radial impurity transport on alcator C-Mod: Bayesian parameter estimation and model selection", *Nuclear Fusion*, vol. 60, núm. 12, 2020, DOI: [10.1088/1741-4326/abae85](https://doi.org/10.1088/1741-4326/abae85)
- [23] A. Fowlie, W. Handley, y L. Su, "Nested sampling cross-checks using order statistics", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 497, núm. 4, pp. 5256-5263, 2020, DOI: [10.1093/mnras/staa2345](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2345)
- [24] W. Zhang *et al.*, "Shift-invariant neural network for image processing: learning and generalization", *Applications of Artificial Neural Networks III*, vol. 1709, pp. 257-268, 1992, DOI: [10.1117/12.140004](https://doi.org/10.1117/12.140004)
- [25] P. Hála, "Spectral classification using convolutional neural networks", arXiv:1412.8341, 2014, DOI: [10.48550/arXiv.1412.8341](https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.8341)
- [26] C. E. Petrillo *et al.*, "Finding strong gravitational lenses in the Kilo Degree Survey with Convolutional Neural Networks", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 472, núm. 1, pp. 1129-1150, 2017, DOI: [10.1093/mnras/stx2052](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2052)
- [27] Y. D. Hezaveh, L. P. Levasseur, y P. J. Marshall, "Fast automated analysis of strong gravitational lenses with convolutional neural networks", *Nature*, vol. 548, pp. 555-557, 2017, DOI: [10.1038/nature23463](https://doi.org/10.1038/nature23463)
- [28] S. Schuldt *et al.*, "HOLISMOKES IV. Efficient mass modeling of strong lenses through deep learning", *Astronomy & Astrophysics*, vol. 646, art. A126, 2021, DOI: [10.1051/0004-6361/202039574](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039574)
- [29] J. W. Park *et al.*, "Large-scale Gravitational Lens Modeling with Bayesian Neural Networks for Accurate and Precise Inference of the Hubble Constant", *The Astrophysical Journal*, vol. 910, núm. 1, 2021, DOI: [10.3847/1538-4357/abdfc4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abdfc4)
- [30] J. Pearson, J. Maresca, N. Li, y S. Dye, "Strong lens modelling: comparing and combining Bayesian neural networks and parametric profile fitting", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 505, núm. 3, pp. 4362-4382, 2021, DOI: [10.1093/mnras/stab1547](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1547)
- [31] V. Busillo *et al.*, "Euclid Quick Data Release (Q1). LEMON - Lens Modelling with Neural networks. Automated and fast modelling of Euclid gravitational lenses with a singular isothermal ellipsoid mass profile", arXiv:2503.15329, 2026, DOI: [10.48550/arXiv.2503.15329](https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.15329)
- [32] R. Parlange *et al.*, "GraviT: transfer learning with vision transformers and MLP-Mixer for strong gravitational lens discovery", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 545, núm. 2, 2026, DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/staf1747>
- [33] R. Cañameras *et al.*, "HOLISMOKES VI. New galaxy-scale strong lens candidates from the HSC-SSP imaging survey", *Astronomy & Astrophysics*, vol. 653, art. L6, 2021, DOI: [10.1051/0004-6361/202141758](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141758)
- [34] A. T. Jaelani *et al.*, "Survey of gravitationally lensed objects in HSC imaging (SUGOH) - X. Strong lens finding in the HSC-SSP using convolutional neural networks", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 535, núm. 2, pp. 1625-1639, 2024, DOI: [10.1093/mnras/stae2442](https://doi.org/10.1093/mnras/stae2442)
- [35] L. P. Garate-Nuñez, A. S. G. Robotham, S. Bellstedt, L. J. M. Davies, y C. Martínez-Lombilla, "The Hyper Suprime-Cam extended point spread functions and applications", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 531, núm. 2, pp. 2517-2530, 2024, DOI: [10.1093/mnras/stae1292](https://doi.org/10.1093/mnras/stae1292)
- [36] A. Krizhevsky, I. Sutskever, y G. E. Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks", *Communications of the ACM*, vol. 60, núm. 6, pp. 84-90, 2017, DOI: [10.1145/3065386](https://doi.org/10.1145/3065386)
- [37] J. J. Ancona-Flores, A. Hernández-Almada, y V. Motta, "Enhancing Gravitational Lens Study with Deep Learning: A Study on Effects Of Dropout Regularization", *Galaxies*, vol. 14, núm. 2, 2026, DOI: [10.3390/galaxies14020018](https://doi.org/10.3390/galaxies14020018)
- [38] R. Kormann, P. Schneider, y M. Bartelmann, "Isothermal elliptical gravitational lens models", *Astronomy and Astrophysics*, vol.



284, pp. 285-299, 1994. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Iso-thermal-elliptical-gravitational-lens-models.-Kor-mann-Schneider/ed1caf1f6fdf1866fc6eac34ee-f6a15e780037b2>

- [39] A. Etherington *et al.*, "Automated galaxy-galaxy strong lens modelling: No lens left behind", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 517, núm. 3, pp. 3275-3302, 2022, DOI: [10.1093/mnras/stac2639](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2639)
- [40] Y. LeCun *et al.*, "Backpropagation Applied To Handwritten Zip Code Recognition", *Neural Computation*, vol. 1, núm. 4, pp. 541-551, 1989, DOI: [10.1162/neco.1989.1.4.541](https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541)
- [41] P. Baldi y P. J. Sadowski, "Understanding Dropout", *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 26, 2013. [En línea]. Disponible en: https://papers.nips.cc/paper_files/paper/2013/hash/71f6278d140af599e06ad9b-f1ba03cb0-Abstract.html
- [42] G. E. Hinton, N. Srivastava, A. Krizhevsky, I. Sutskever, y R. R. Salakhutdinov, "Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors", arXiv:1207.0580, 2012, DOI: [10.48550/arXiv.1207.0580](https://doi.org/10.48550/arXiv.1207.0580).
- [43] I. Salehin y D.-K. Kang, "A Review on Dropout Regularization Approaches for Deep Neural Networks within the Scholarly Domain", *Electronics*, vol. 12, núm. 14, 2023, DOI: [10.3390/electronics12143106](https://doi.org/10.3390/electronics12143106)
- [44] J. L. Sérsic y Universidad Nacional de Córdoba Observatorio Astronómico, *Atlas de galaxias australes*. Argentina: Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de Córdoba, 1968.
- [45] S. Mukherjee *et al.*, "SEAGLE — I. A pipeline for simulating and modelling strong lenses from cosmological hydrodynamic simulations", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 479, núm. 3, pp. 4108-4125, 2018, DOI: [10.1093/mnras/sty1741](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1741)
- [46] R. Caruana, "Multitask Learning", *Machine Learning*, vol. 28, pp. 41-75, 1997, DOI: [10.1023/A:1007379606734](https://doi.org/10.1023/A:1007379606734)
- [47] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, y E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, núm. 4, pp. 600-612, 2004, DOI: [10.1109/tip.2003.819861](https://doi.org/10.1109/tip.2003.819861)
- [48] T. Treu y L. V. E. Koopmans, "Massive Dark Matter Halos and Evolution of Early-Type Galaxies to $z \approx 1$ ", *The Astrophysical Journal*, vol. 611, núm. 2, pp. 739-760, 2004, DOI: [10.1086/422245](https://doi.org/10.1086/422245)



Structural integrity assessment of concrete slabs using statistical indicators and neural networks

Evaluación de la integridad estructural de losas de concreto mediante indicadores estadísticos y redes neuronales

Yoselin Garrido Hernández¹
Martín Valtierra Rodríguez¹
José Manuel Machorro López²
José Trinidad Pérez Quiroz²
Juan Pablo Amezquita Sánchez^{1*}

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

² Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México.

*jamezquita@uaq.mx

05

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

Y. Garrido Hernández, M. Valtierra Rodríguez, J. M. Machorro López, J. T. Pérez Quiroz, J. P. Amezquita Sánchez, "Structural integrity assessment of concrete slabs using statistical indicators and neural networks", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm. 16, pp. 75-88, 2026.



Abstract

Civil structures are critical for safety and serviceability, but they are continuously exposed to deterioration mechanisms that may compromise their integrity. This study proposes a vibration-based methodology for the automatic condition assessment of concrete slabs by combining statistical indicators (SI) as to identify representative features of monitored waves, linear discriminant analysis

(LDA) to reduce dimensionality and enhance class separability, and a multilayer perceptron (MLP) to automatically classify the extracted features for structural condition evaluation. The obtained results, with 97.5% validation accuracy and 99% overall accuracy, demonstrate the effectiveness of the proposed approach for the reliable identification of damage conditions in concrete slabs.

Keywords: concrete slabs, damage detection, linear discriminant analysis, mechatronics, multilayer perceptron, structural health monitoring.

Resumen

Las estructuras civiles son fundamentales para la seguridad y la funcionalidad, pero están continuamente expuestas a mecanismos de deterioro que pueden comprometer su integridad. Este estudio propone una metodología basada en vibraciones para la evaluación automática del estado de losas de concreto. Para ello, se combinan indicadores estadísticos (SI) para extraer características representativas de las señales monitoreadas, los análisis discriminantes lineales (LDA)

para reducir la dimensionalidad y mejorar la separabilidad entre las clases, y un perceptrón multicapa (MLP) para clasificar automáticamente las características extraídas para evaluar las condiciones estructurales. Estos resultados, con una precisión de validación de hasta 97.5 % y una precisión global del 99 %, demuestran la efectividad del enfoque propuesto para la identificación confiable de condiciones de daño en losas de concretos.

Palabras clave: losas de hormigón, detección de daños, análisis discriminante lineal, mecatrónica, perceptrón multicapa, monitorización del estado estructural.



Introduction

Bridges are fundamental civil structures for connectivity, transportation, and economic development [1], [2]. But, although designed for durability, their continuous exposure to dynamic loads and environmental factors progressively deteriorates critical elements such as concrete slabs and decks [2], [3]. Any undetected damage to these components compromises structural safety and service continuity [4], therefore, structural health monitoring (SHM) has become an essential discipline for assessing infrastructure condition via its dynamic properties [2], [3]. Moreover, visual inspections and local non-destructive testing techniques (*e.g.*, ultrasound or ground-penetrating radar) are common, but their intrusive nature and expertise requirement limit their effectiveness for continuous monitoring [1], [4]. In contrast, vibration-based SHM presents as a robust alternative that habilitates for global and automated structural condition assessment to overcome the limitations of traditional approaches [3].

The practical implementation of this global monitoring comprises three fundamental stages: signal acquisition, processing, and interpretation [1]. The processing stage represents the greatest technical challenge, since vibration signals in civil infrastructures, particularly in slabs, are inherently noisy and non-stationary [2]. For example, the fast Fourier transform (FFT), although reliable for quasi-stationary signals with low noise levels [5], is limited in this context because actual structural vibrations do not meet ideal conditions, as noted in [6]. In this regard, [7] combined operational modal analysis with stochastic subspace identification to estimate natural frequencies and mode shapes in pedestrian bridges; however, although crack detection was achieved, diagnostic accuracy remained susceptible to subjective interpretation.

On the other hand, [8] employed finite element models (FEM) and impact-echo test simulations to analyze concrete slabs vibration signals using the wavelet transform; the method identified cracks and notches both at the center and edges, and offered an objective signal-energy-changes-based diagnosis. Same way, [9] integrated FEM models with Shannon-entropy-optimized wavelet energy accumulation to detect and localize fatigue damage in critical structural elements of vehicular bridges. Similarly, [10] used operational modal analysis (OMA) and the frequency domain decomposition (FDD) technique to identify damage in prestressed concrete beams, commonly used in bridges, through ambient vibration. The study demonstrated that, despite natural frequencies' relative insensitivity to changes in prestressing, variations in the mode shapes obtained through FDD allow for crack (shear and flexural)-caused damage identification before the structure reaches



its critical state. Nevertheless, implementing complex models often requires high computational load or the use of transforms that become unreliable under severe noise conditions.

In the face of these results, there is a need to develop approaches that simplify feature extraction through more direct and reliable parameters, enabling accurate, rapid, and automated structural integrity diagnoses. The present work describes a vibrational analysis methodology to automatically assess the structural condition of concrete slabs excited by an impact hammer.

Theoretical background

Statistical indicators (SI)

SI are quantitative metrics extracted from time-domain signals to identify characteristic patterns [11], which is essential for diagnosis in civil structures, electrical machines, and neurological conditions [12], [13]. They demand for fewer mathematical operations than other methods, enabling real-time implementation [14]. Such indicators can be classified into time-domain and frequency-domain categories.

This work relies on 10 time-domain, and 4 frequency-domain SI, whose mathematical expressions are displayed in Table 1. Notation works as follows:

- x_i represents the time-domain signal, with $i = 1, 2, \dots, N$, where N is the number of data points.
- p_i denotes the FFT-computed power spectrum of x_i , likewise with $i = 1, 2, \dots, N$, where N is the number of spectral lines
- f_i is the frequency value of the i^{th} spectral line [11].

These SI (mode, mean frequency, median, root mean square frequency, mean, frequency center, variance, root variance frequency, skewness, kurtosis, 5th moment, 6th moment and skewness factor) were selected because they provide a compact and computationally efficient representation of the vibration response, allowing the identification of changes associated with structural damage with no need of more complex signal transformations.

TABLE 1. Time-domain and frequency-domain statistical indicators [14]. Source: own-elaboration.

Indicator	Mathematical Definition		Indicator	Mathematical Definition	
	Time Domain			Frequency Domain	
Mode	$X_{mo} = mode(x_i)$	(1)	Mean Frequency	$F_{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i$	(11)
Median	$X_{me} = magnitude(\frac{N+1}{2})$	(2)	Root Mean Square Frequency	$F_{rms} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i^2 p_i}{\sum_{i=1}^N p_i}$	(12)
Mean	$X_{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$	(3)	Frequency Center	$F_{fc} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i p_i}{\sum_{i=1}^N p_i}$	(13)
Variance	$X_{\sigma^2} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2$	(4)	Root Variance Frequency	$F_{rvf} = (\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - F_{\mu})^2 p_i}{\sum_{i=1}^N p_i})^{1/2}$	(14)
SKEWNESS	$X_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{\mu})^3}{(N-1)x_{\sigma}^3}$	(5)			
KURTOSIS	$X_{ku} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{\mu})^4}{(N-1)x_{\sigma}^4}$	(6)			
5 TH MOMENT	$X_{5^{th}m} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{\mu})^5}{(N-1)x_{\sigma}^5}$	(7)			
6 TH MOMENT	$X_{6^{th}m} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{\mu})^6}{(N-1)x_{\sigma}^6}$	(8)			
SKEWNESS FACTOR	$X_{skf} = \frac{X_{sk}}{X_{rms}^3}$	(9)			
KURTOSIS FACTOR	$X_{kuf} = \frac{X_{ku}}{X_{rms}^4}$	(10)			

Linear discriminant analysis

Dimensionality reduction transforms high-dimensional data sets into a lower-dimensional space, by eliminating redundancies and reducing computational complexity [15]. In this respect, LDA accomplishes this objective through a linear combination of features that maximizes between-class separation and minimizes within-class variance [15], [16]. The LDA projection process from the original feature set (S_f) to a lower-dimensional subspace (V_k) requires a sequence of three steps [15]:

- 1) Computing the between-class scatter matrix (S_b), which measures the separability among the means of different classes.
- 2) Estimating the within-class scatter matrix (S_w), which quantifies the dispersion of samples relative to their class mean.
- 3) Constructing the transformation matrix (W) to project the data onto the subspace V_k , simultaneously maximizing S_b and minimizing S_w (15).

$$S_w W = \lambda S_b W \quad (15)$$



Where λ represents the eigenvalues of the transformation matrix W . The solution to this problem is obtained by calculating the (scalar) eigenvalues $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ and (non-zero) eigenvectors $V = V_1, V_2, \dots, V_m$ of $W = S_{(1/w)} S_b$, provided that S_w is non-singular and m is the number of features. These characteristics satisfy Equation (15) and provide information about the LDA space.

Multilayer perceptron neural networks (MLP)

Artificial neural networks are interconnected computational units inspired by biological neural systems [13], [17]. They are applied in data classification, process control, and systemic outcome prediction [13]. Their most common architecture is the MLP (or feed-forward network), where a basic configuration with a single hidden layer transforms an input vector $x = (x_1, \dots, x_d)^T$ into an output vector $o = (o_1, \dots, o_d)^T$.

For an MLP architecture with one hidden layer, the outputs are defined by Equation (16):

$$o_{1=\beta_0} + \sum_{j=1}^p \beta_j \psi(\gamma_{j0} + \sum_{s=1}^d x_{is} \gamma_{js}), i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

Where:

- γ_{js} the weight for input x_{is}
- β_j the weight associated with hidden unit j
- γ_{j0}, β_0 the biases for the hidden nodes and output units, respectively
- p the amount of hidden nodes
- ψ the activation function, which is typically non-linear [17]

Methodology

To evaluate the vibrational response of a civil structure, it is necessary to subject it to forced dynamic excitation produced by natural phenomena (*e.g.*, wind, earthquakes) or artificial tools (*e.g.*, impact hammer, mechanical shaker), that generate low-amplitude vibration responses of a noisy nature [2]. In this work,



an impact hammer is used as a controlled excitation source to induce vibrational responses in concrete slabs.

First, 14 statistical indicators are extracted from the monitored signals to estimate features associated with the slab's structural condition. Then, LDA is applied to reduce the dimensionality of the feature space to 6 components. Finally, the reduced feature set is used to train and validate an MLP for automatic classification of the slab condition into *healthy* or *damaged* states. To ensure an optimal balance between the generalization capability of the network and stability throughout the training phase, the MLP architecture was defined as follows: 6 neurons in the input layer (one for each indicator), 20 neurons in the hidden layer, a number determined through iterative testing to achieve the best performance, and 2 neurons in the output layer, representing each of the structural conditions evaluated (healthy slab and damaged slab). The sigmoid activation function was selected for both the hidden and output layers. Additionally, a stratified split was implemented, allocating 60% of the data for training and 40% for validation to ensure a balanced representation of both classes.

The methodology was experimentally validated on concrete slabs, identifying alterations in the vibrational response associated with perforations (cored) and cracks in relation to an undamaged condition. Figure 1 presents a flowchart of the proposed methodology.

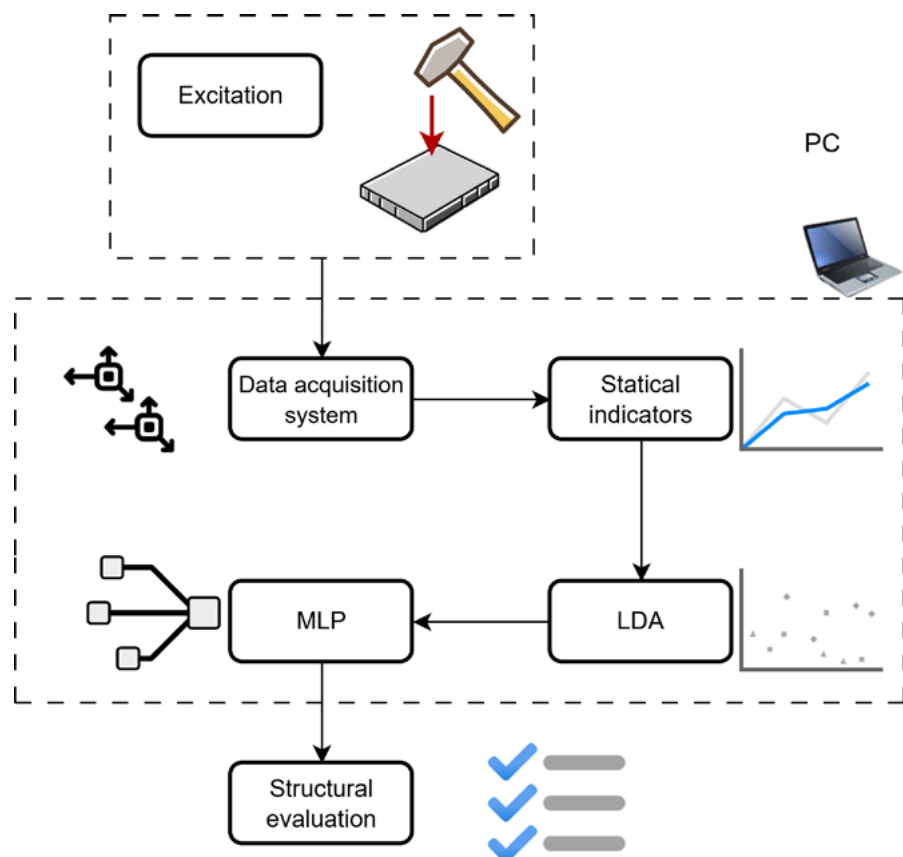


FIGURE 1.
Flowchart of the
proposed methodology.
Source: own
elaboration.



Experimental setup

To validate the proposed methodology, an experimental study was conducted on two 2×2 m, 11 cm thick concrete slabs at a height of 0.68 m above ground level. These specimens are designed to emulate slab-type structural elements commonly applied in bridge infrastructure. One slab remained in a healthy condition, while the other was subjected to controlled damage consisting of two through-thickness cores and one 0.09 m depth partial core, as shown in Figure 2. The exact location of the perforations is also indicated in Figure 3, where the green dots represent the through-thickness cores and the yellow dot represents the partial core.

FIGURE 2.
Induced cored perforations in the concrete slab: through-thickness (circled green) and partial (circled yellow).
Source: own photograph.

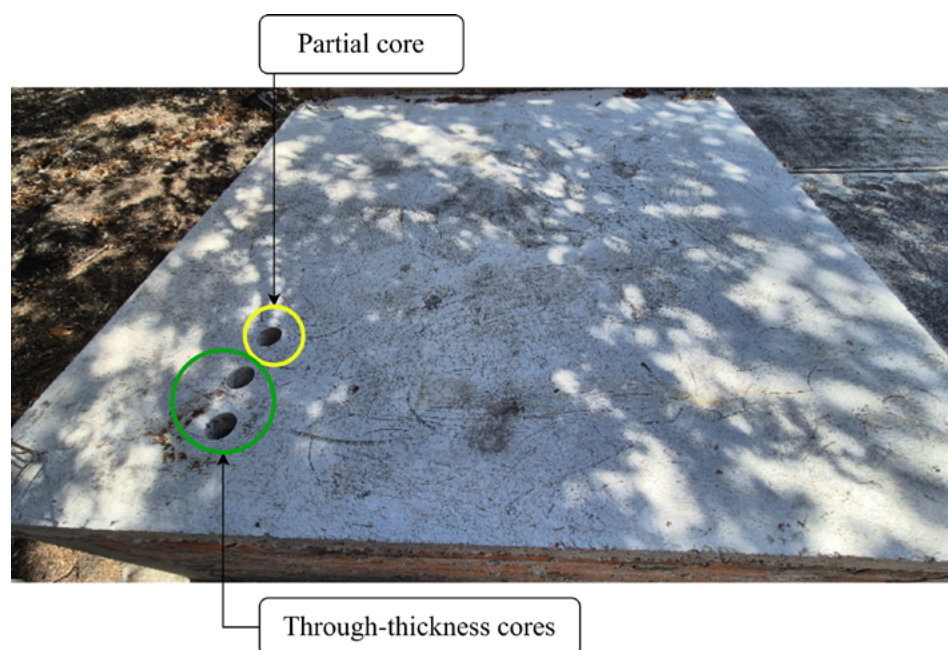
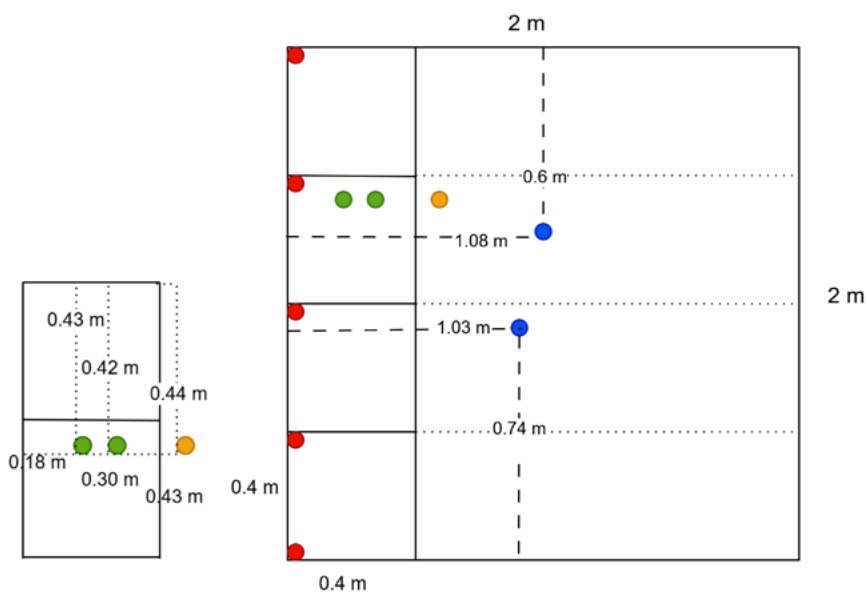


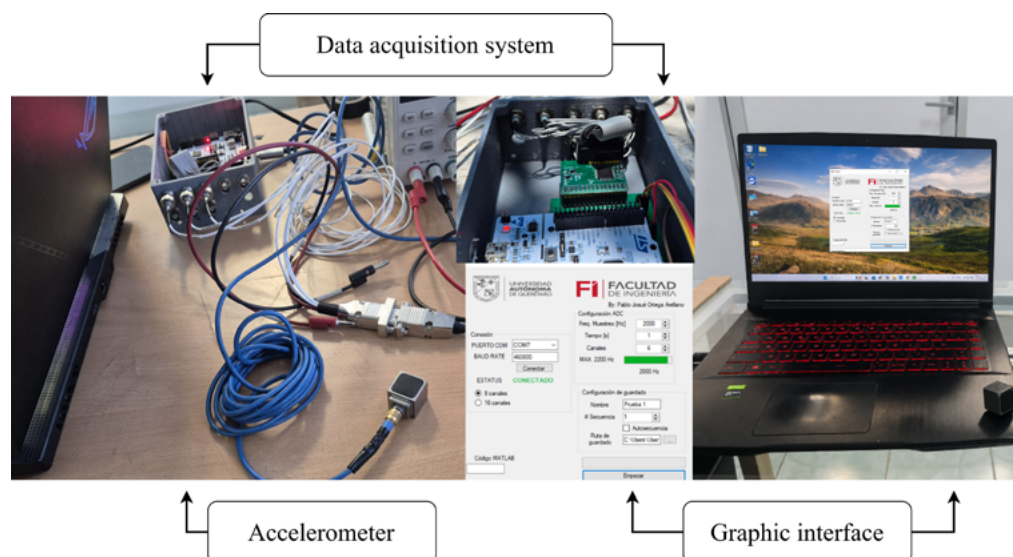
FIGURE 3.
Perforation distribution and sensor locations. Source: own elaboration.





A Kistler 9728A20000 impact hammer was used as the excitation source to induce the vibrational response of the slabs. To measure this response, a vibration monitoring system consisting of two Kistler 8395A triaxial analog accelerometers was implemented (Figure 4). The first sensor recorded the structural response along the A_x , A_y , and A_z axes through channels 1, 2, and 3, respectively. Similarly, the second accelerometer captured vibrations for the same axes across channels 4, 5, and 6. Each accelerometer has a 0-1000 Hz frequency response and a sensitivity of 400 mV/g ± 10 g measurement range. The locations of the sensors are represented in Figure 3 by blue dots. The sampling frequency was fixed at 2000 Hz in accordance with the accelerometers operating bandwidth. This value satisfies the Nyquist-Shannon criterion of at least twice the maximum frequency component of interest (1000 Hz), thereby preventing aliasing and ensuring proper digitization of the acquired vibration signals [18].

FIGURE 4.
Vibration monitoring
system. Source: own
elaboration.



The responses are measured using a custom-designed data acquisition system based on an STM32 Nucleo board (model MB1136), which integrates an STM32F401R microcontroller with an ARM Cortex-M4 core featuring a floating-point unit (FPU) and support for DSP instructions. The integrated analog-to-digital converter offers a 16-bit resolution with a sampling capability of up to 2.4 MHz.

For the tests, a 0.4×0.4 m grid was imposed on the edge of the damaged slab, coinciding with the proximity of the cored holes. Five impact points were established as observed in Figure 3 (red dots), and each was excited 10 times with the hammer, totaling 50 tests per specimen. The same conditions were replicated on the healthy slab, ultimately obtaining 100 experimental tests (50 per condition). The response capture time was set to 5 seconds; however, the vibrational responses were subsequently trimmed to a 2 second window, consisting



of 0.5 seconds prior to impact detection and 1.5 seconds following it in order to focus the analysis on the transient region of greatest dynamic interest, as the impact of energy dissipates rapidly due to the slab volume being significantly larger than the areas of interest.

Results and discussion

Figure 5 presents the vibrational responses obtained for both conditions. For illustrative purposes, only the results corresponding to the first sensor (channels 1 to 3) per condition are shown. As it can be observed, differences are not apparent between the slabs; for this reason, it is necessary to apply processing methods to adequately differentiate the structural conditions of the specimens. Subsequently, the trimmed vibration signals produced a total of 84 statistical indicators. This process enabled the extraction of quantitative features that describe the distribution and temporal evolution of the responses. These features serve as the fundamental input for the next stage of the methodology.

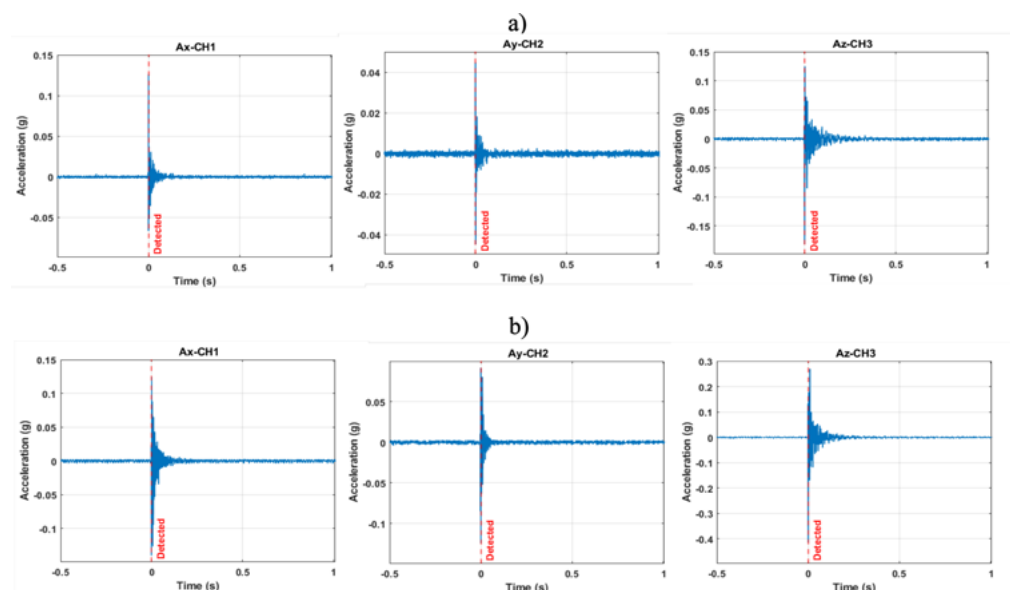


FIGURE 5.
Raw time-domain
signals for a) healthy
and b) damaged
concrete slabs. Source:
own elaboration.

Next, LDA application revealed six influential indicators ($k = 6$), of which five correspond to root variance frequency and one to root-mean-square frequency. The resulting 3D subspace, which serves as the basis for class separability, is shown in Figure 6.

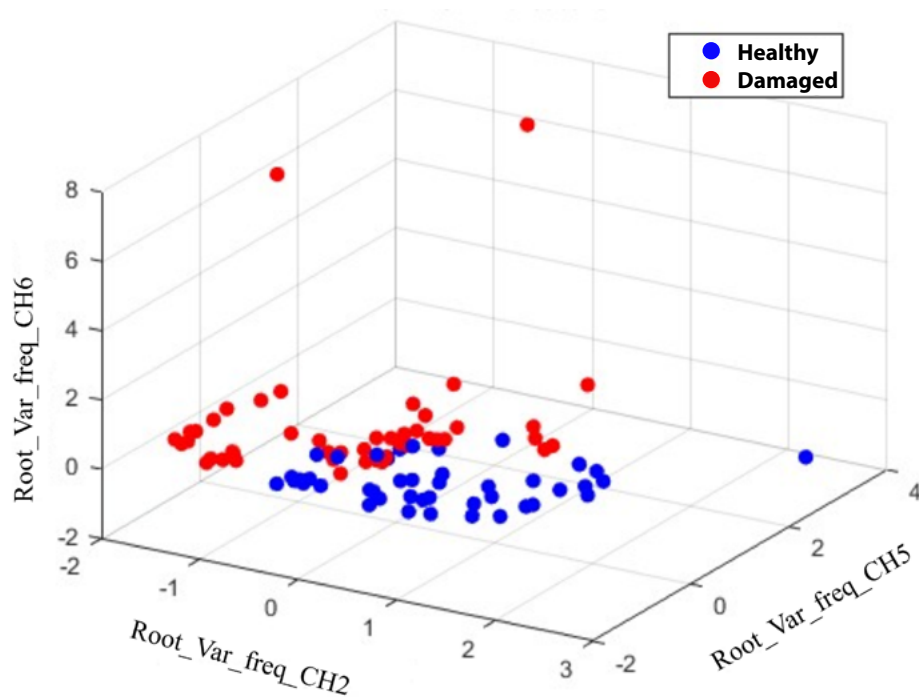


FIGURE 6.
Three-dimensional
subspace obtained via
LDA. Source: own
elaboration.

Finally, regarding the training process, Figure 7 shows the network performance. The best validation performance was achieved at epoch 20, reaching a cross-entropy value of 0.04915. The convergence of the training and validation curves indicates a stable learning process without signs of overfitting, as the validation error remains close to the training error before stabilizing.

The confusion matrix for the validation stage (Figure 8) shows a high degree of reliability, achieving 97.5% accuracy. The network correctly identified all 20 healthy samples and 19 out of 20 damaged samples.

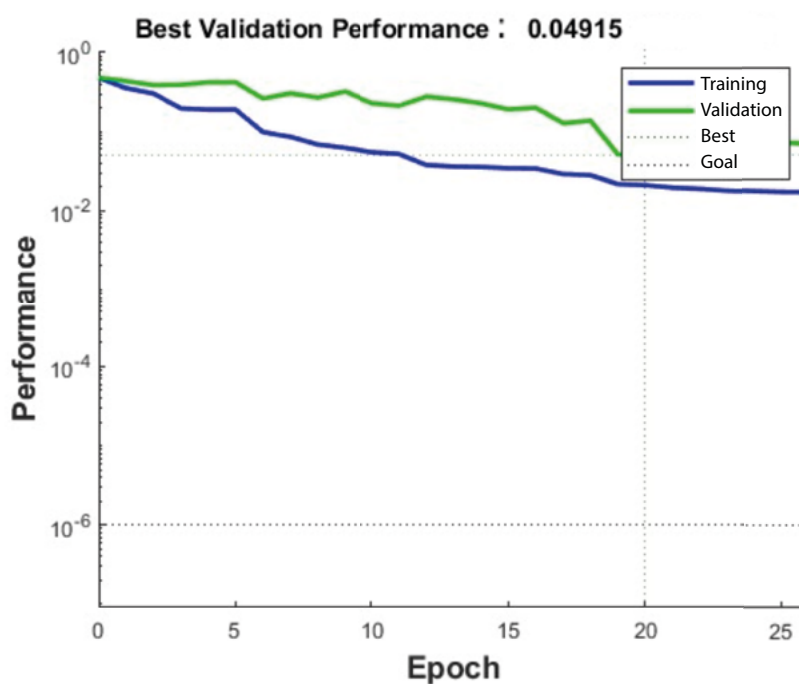


FIGURE 7.
Training and valida-
tion performance
curves for the MLP.
Source: own
elaboration.



Validation Confusion Matrix

Output Class	Healthy	20 50.0%	1 2.5%	95.2% 4.8%
	Damage	0 0.0%	19 47.5%	100% 0.0%
		100% 0.0%	95.0% 5.0%	97.5% 2.5%
		Healthy	Damage	
		Target Class		

FIGURE 8.

Matrix resulting from the MLP application.
Source: own elaboration.

When considering the entire dataset, the system reached a global accuracy of 99%, with only one misclassification in the total universe of 100 samples. The concentration of results along the main diagonal confirms that the MLP, fed with the selected indicators, can establish robust decision boundaries capable of distinguishing subtle structural changes in the concrete slabs.

Conclusions

This study demonstrates the effectiveness of the proposed methodology, which integrates SI, LDA, and MLP to automatically assess the condition of concrete slabs. In particular, the integration of these techniques allowed for a significant dimensionality reduction, transitioning from 84 initial features to the 6 most discriminant indicators, primarily associated with root variance frequency, thereby optimizing computational efficiency. The proposed model achieved a reliable classification accuracy of 97.5%, successfully distinguishing between healthy and damaged states. This high level of accuracy validates the synergy between



energy-based statistical features and non-linear classifiers for reliable structural diagnosis.

However, while the binary classification proved robust, the current scope is limited to the detection of damage as a single class. Future research should focus on the implementation of multi-class algorithms to achieve precise localization and quantification of damage severity. Furthermore, evaluating the system under varying environmental conditions and across diverse damage typologies will be essential to enhance the generalizability and readiness of the model for real-time, large-scale infrastructure monitoring.

Acknowledgments

This work was supported by the “Fondo para el Fortalecimiento de la Investigación, Vinculación y Extensión (FONFIVE-UAQ 2024)” project, in addition to the Secretariat of Science, Humanities, Technology, and Innovation (SECIHTI-México), through scholarship number 4045351, granted to Osiris Yoselin Garrido Hernández. Additionally, the authors acknowledge the support of the Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII)-SECIHTI-México.

Funding

The authors declare that they did not receive specific funding for conducting this research work.

Referencias

- [1] C. J. Hernández-Maqueda *et al.*, “Incipient Damage Detection in a Truss-Type Bridge using vibration responses and MUSIC technique,” presented at the 2022 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2022, Nov. 9-11, 2022.
- [2] J. P. Amezcua-Sánchez and H. Adeli, “Signal Processing Techniques For Vibration-Based Health Monitoring Of Smart Structures,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 1-15, 2014, DOI: [10.1007/s11831-014-9135-7](https://doi.org/10.1007/s11831-014-9135-7)
- [3] C. Zhang *et al.*, “Vibration feature extraction using signal processing techniques for structural health monitoring: A review,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 177, art. 109175, 2022, DOI: [10.1016/j.ymssp.2022.109175](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109175)
- [4] A. Moreno Gómez, “Detección, localización y cuantificación de daños en estructuras civiles metálicas midiendo vibraciones,” Ph.D. dissertation, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2019. [Online]. Available: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1693>
- [5] Y. Yang, Y. Zhang, and X. Tan, “Review on Vibration-Based Structural Health Monitoring Techniques And Technical Codes,” *Symmetry*, vol. 13, no. 11, p. 1998, 2021, DOI: [10.3390/sym13111998](https://doi.org/10.3390/sym13111998)
- [6] T. Q. Nguyen, D. P. Nguyen, P. T. Nguyen, and T. T. Nguyen, “Enhanced structural damage detection through combined MODWT and FFT for power spectral density separation in beam vibration analysis,” *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 44, no. 3, pp. 1746-1773, 2025, DOI: [10.1177/14613484251320234](https://doi.org/10.1177/14613484251320234)



- [7] Á. E. Rodríguez Suesca, "Evaluación de vibraciones en el diagnóstico de estructuras: Estudio de comportamiento de estructuras en deterioro," Ph.D. dissertation, Departamento de Ingeniería, Universidad de Granada, España, 2021. [Online]. Available: <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll23/id/1833>
- [8] H. Jahangir, M. Khatibinia, and M. Mokhtari Masinaei, "Damage Detection in Prestressed Concrete Slabs Using Wavelet Analysis of Vibration Responses in the Time Domain," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 37-63, 2022, DOI: [10.22075/jrce.2021.23385.1510](https://doi.org/10.22075/jrce.2021.23385.1510)
- [9] J. M. Machorro López *et al.* "Método basado en entropía-WAVELET para eficientar la identificación de daño en puentes," Instituto Mexicano de Transporte, Querétaro, México, Publicación Técnica No. 778, 2023.
- [10] E. Gandelli, G. Rossini, S. G. Mantelli, and F. Minelli, "Damage detection of prestressed concrete beams affected by shear and flexure cracks through vibration monitoring," *Engineering Structures*, vol. 304, art 117572, 2024, DOI: [10.1016/j.engstruct.2024.117572](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117572)
- [11] Y. Lei and Z. Wu, "Time series classification based on statistical features," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2020, art. 46, 2020, DOI: [10.1186/s13638-020-1661-4](https://doi.org/10.1186/s13638-020-1661-4)
- [12] C. A. Perez-Ramirez *et al.*, "Time-frequency techniques for modal parameters identification of civil structures from acquired dynamic signals," *Journal of Vibroengineering*, vol. 18, no. 5, pp. 3164-3185, 2016, DOI: [10.21595/jve.2016.17220](https://doi.org/10.21595/jve.2016.17220)
- [13] J. J. Yanez-Borjas *et al.*, "A new damage index based on statistical features, PCA, and Mahalanobis distance for detecting and locating cables loss in a cable-stayed bridge," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 21, no. 9, art. 2150127, 2021, DOI: [10.1142/S0219455421501279](https://doi.org/10.1142/S0219455421501279)
- [14] R. de Almeida Cardoso, A. Cury, and F. Barbosa, "Automated real-time damage detection strategy using raw dynamic measurements," *Engineering Structures*, vol. 196, art. 109364, 2019, DOI: [10.1016/j.engstruct.2019.109364](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109364)
- [15] S. Balakrishnama and A. Ganapathiraju, *Linear discriminant analysis: A brief tutorial*, USA: Institute for Signal and Information Processing, 1998.
- [16] A. Tharwat, T. Gaber, A. Ibrahim, and A. E. Hassanien, "Linear discriminant analysis: A detailed tutorial," *The European Journal on Artificial Intelligence*, vol. 30, no. 2, pp. 169-190, 2017, DOI: [10.3233/AIC-170729](https://doi.org/10.3233/AIC-170729)
- [17] S. Chakraborty and M. Ghosh, "Applications of Bayesian Neural Networks in Prostate Cancer Study," in *Handbook of Statistics*, vol. 28, R. Chakraborty, C. R. Rao, and P. Sen, Eds. The Netherlands: Elsevier, 2012, pp. 241-262, DOI: [10.1016/B978-0-44-451875-0.00009-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-44-451875-0.00009-9).
- [18] C.E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise," *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949, DOI: [10.1109/JRPROC.1949.232969](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969)



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

? perspectivasci@uaq.mx

.....
REVISTA INCLUIDA EN:
.....

VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

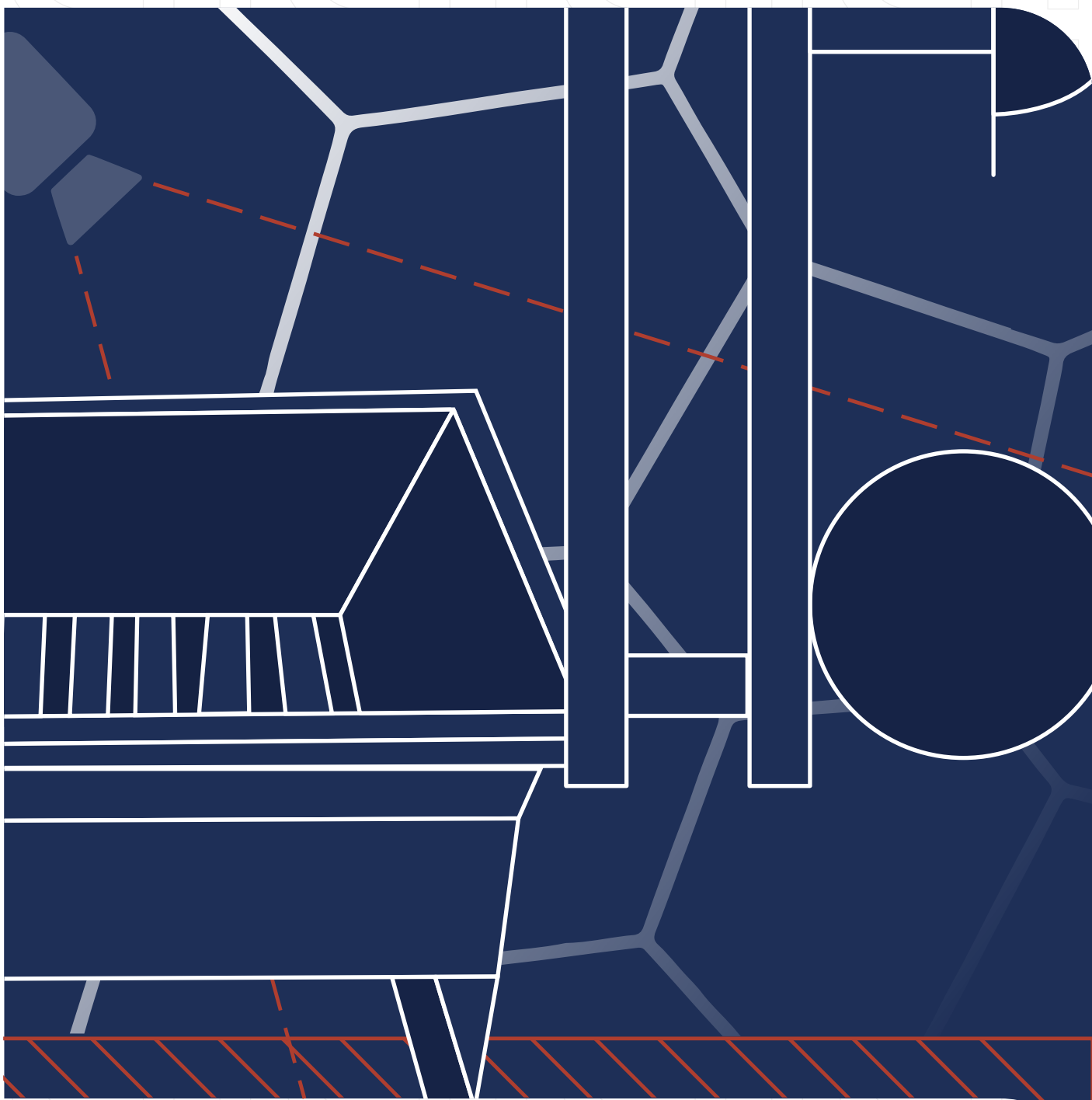
EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

D | DESPACHO DE
PUBLICACIONES

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería