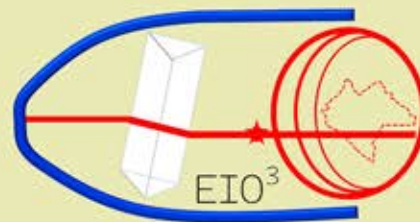




REVISTA
TECNOLOGÍA
DIGITAL

“Semillero de Investigadores”

ISSN: 2007-9400



Cuarto Encuentro Internacional de Investigación
en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica

Ejemplar de divulgación

“Tecnología para la sociedad”

Índice LatIndex: Folio 23658

www.revistatecnologiadigital.com

Desde 2011

Volumen Número

15 1

Año 2025

REVISTA TECNOLOGÍA DIGITAL

CONSEJO EDITORIAL

Editor Principal. Dr. Jorge Luis Camas Anzueto

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

jcamas@tuxtla.tecnm.mx

Editores Invitados:

Dr. Rubén Grajales Coutiño

ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx

Dr. Pedro Marcos Velasco Bolom

D09270506@tuxtla.tecnm.mx

C. Dr. Marcoantonio Ramírez Morales

D14270621@tuxtla.tecnm.mx

Tecnológico Nacional de México/I.T. de Tuxtla Gutiérrez

Autoridades

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

M.C. José Manuel Rosado Pérez

Director

Ing. María Delina Culebro Farrera

Subdirectora Académica

Revista Tecnología Digital.

Índice LatIndex: 23658.

ISSN: 2007-9400.

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Carretera Panamericana Km. 1080.

C.P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Departamento de Sistemas y Computación.

01-961-6150461 Ext. 319

www.revistatecnologiadigital.com

Editor Responsable.

Editorial Tecnología Didáctica®.

Dr. Héctor Guerra Crespo.

Registro del padrón de editores: 970-94054 de fecha 22-junio-2004.

Palenque 139 Col. ISSSTE, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

C.p. 29060, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

www.tecnologiadidactica.com

Número en colaboración.

Este número es una colaboración con el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en el marco de su 53 aniversario en el Cuarto Encuentro Internacional de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica (EIO³) celebrado el 20 y 21 de octubre de 2025. La revisión de artículos, edición y verificación de similitud se llevaron a cabo por el comité organizador del Encuentro de Investigación.

Revista Tecnología Digital. Año 15, Volumen 15, Número 1 de 21 de octubre de 2025 es una publicación anual on-line www.revistatecnologiadigital.com editada por Héctor Guerra Crespo oficinas en Palenque 139 Col. ISSSTE Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México C.P. 29060. correo-e hgcrespo@hotmail.com. Editor responsable: Héctor Guerra Crespo. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2014-022811040300-203 otorgado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. ISSN 2007-9400. Responsable de la última actualización de este número Dr. Héctor Guerra Crespo, Presidente del Consejo Editorial, Palenque 139 Colonia ISSSTE Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29060, fecha de la última modificación 21 de octubre de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del editor responsable.

Índice.

	Página.
Clasificación de imágenes de plataformas multimedia con algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales artificiales.	 1
Diseño de un modelo educativo con Inteligencia Artificial sobre técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo.	 13
Fibras ópticas ultradelgadas: Revisión de métodos de fabricación y aplicaciones en ingeniería avanzada.	 27
Instrumentación para detección de astropartículas y clima espacial en la UNACH.	 47
Interferometría Estelar: Principios y demostraciones prácticas.	 61
La importancia de los sensores de fibra óptica en el monitoreo del deterioro estructural en concreto.	 71
Plasma frío como herramienta emergente: aplicaciones en alimentos.	 81
Sensor de pH basado en fibra óptica con cubierta de grafeno.	 91
Tecnología de microondas rápida, sencilla y eficiente: fundamentos y aplicaciones en la despolimerización de lignina.	 99

Clasificación de imágenes de plataformas multimedia con algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales artificiales.

Image classification from multimedia platforms with machine learning algorithms and artificial neural networks.

Esperanza Guerra Rosas* (1).
Universidad Autónoma de Baja California, Campus Ensenada.
esperanza.guerra@uabc.edu.mx.

Josué Álvarez Borrego (2). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada,
josue@cicese.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 22, 2025; aceptado en octubre 01, 2025.

Resumen.

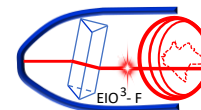
Los algoritmos de aprendizaje de máquina y redes neuronales artificiales permiten reconocer y clasificar imágenes por medio de patrones característicos de imágenes. Existen diferentes métodos de extracción de características, algunos se basan en la textura de imágenes. En este trabajo se presenta una metodología para clasificar imágenes de plataformas multimedia, se obtuvieron características de textura, como Patrón Binario Local (LBP), matrices de coocurrencia de niveles de grises (GLCM) y el método de Wavelet image scattering (WIS). Se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales artificiales. Se utilizó un conjunto de datos de imágenes de mosaicos y un conjunto de descriptores, cada uno con imágenes de diferentes clases. Se aplicaron métricas para evaluar el desempeño de los algoritmos de aprendizaje y las redes neuronales. Finalmente se compararon los resultados obtenidos para la clasificación tanto de mosaicos como de descriptores. Como resultado se obtuvieron valores significantes, que pueden ayudar a usuarios de plataformas multimedia a seleccionar contenido y a compañías de multimedia a sugerir contenido visual de series o películas.

Palabras claves: Algoritmos de aprendizaje automático, descriptores, métodos de textura, mosaicos, plataformas multimedia, redes neuronales artificiales.

Abstract.

Machine learning algorithms and artificial neural networks allow image recognition and classification based on characteristic image patterns. There are various feature extraction methods, some of which are based on image texture. This work presents a methodology for classifying images from multimedia platforms. Texture features such as Local Binary Pattern (LBP), Gray Level Co-occurrence Matrices (GLCM), and the Wavelet Image Scattering (WIS) method were obtained. Machine learning algorithms and artificial neural networks were used. A dataset of mosaic images and a set of descriptors, each with images from different classes, were used. Metrics were applied to evaluate the performance of the learning algorithms and neural networks. Finally, the results obtained for classifying both mosaics and descriptors were compared. The results obtained yielded significant values, which can help users of multimedia platforms select content and multimedia companies suggest visual content for series or movies.

Keywords: Artificial neural networks, descriptors, machine learning algorithms, mosaics, multimedia platforms, texture methods,



1. Descripción de la conferencia.

Desde la década de 1950 la Inteligencia Artificial (IA) ha presentado diversos avances. Actualmente la IA continúa avanzando con desarrollos novedosos que transforman la forma de vivir del ser humano y el entorno de trabajo. El mercado de plataformas multimedia ofrece diversas opciones como Netflix, Apple TV, Disney, HBO Max, entre muchas otras (Jenner, 2023). El crecimiento de ofertas de contenido en estas plataformas presenta desafíos a los usuarios en términos de navegación y descubrimiento de nuevos títulos de interés. El uso de sistemas de recomendación y clasificación facilita la visibilidad de contenido, selección y personalización del usuario. Por otra parte, también resulta de gran utilidad para usuarios empresariales para el análisis de datos, administración de publicidad, moderación de contenido, hábito de consumo y preferencias de su audiencia (Jannach et al., 2021).

El reconocimiento y procesamiento de imágenes es un campo extenso que incluye técnicas de Inteligencia Artificial de forma automática para reconocimiento facial, detección de objetos, análisis de imágenes médicas, seguridad, control de calidad, agricultura, análisis satelital para el monitoreo de cultivos, automatización industrial, entre otras aplicaciones en distintas áreas.

Debido a la existencia de distintas plataformas multimedia es necesario utilizar herramientas para procesar y analizar grandes cantidades de datos que permitan identificar y detectar características visuales como objetos, personas o lugares con alta precisión, lo que mejora la interacción entre las plataformas y los usuarios (Badr et al., 2024).

Las plataformas de multimedia generan grandes volúmenes de imágenes, esta cantidad de información puede analizarse y etiquetarse en categorías o clases. Técnicas de Inteligencia Artificial y algoritmos de Redes Neuronales Artificiales procesan grandes cantidades de datos y la clasificación depende de las características de entrada. La extracción de características es una etapa fundamental en el procesamiento de datos para los modelos de IA, algunos métodos para extraer características representativas se basan en el análisis de texturas en las imágenes.

En este trabajo se presenta una metodología para analizar y clasificar imágenes de acuerdo al contenido visual de los usuarios de distintas plataformas multimedia, en tiempo real. El banco de imágenes contiene una base de datos de mosaicos y una de descriptores, cada una con imágenes de distintas plataformas multimedia que se obtuvieron del dispositivo Core Meter. Una imagen de tipo mosaico contiene secciones en miniatura de series y películas disponibles para las plataformas multimedia, que permiten al usuario ver las diferentes opciones que tiene para elegir una serie o película. Una imagen de tipo descriptor consiste en la descripción de la serie o película elegida de un mosaico.

Se analizaron tres técnicas para extraer vectores de características basados en la textura de imágenes. La técnica Patrones Binarios Locales (LBP) permite extraer información de la textura presente en las imágenes, se basa en los contornos, esquinas, puntos y regiones planas, es un operador simple y muy eficiente, es robusto a cambios de iluminación y rotación (Guerra-Rosas et al., 2023). La matriz de coocurrencia de escala de grises (GLCM) extrae parámetros de textura basados en ocurrencias de los valores de intensidad de píxeles en dirección horizontal y vertical, se calcula en cualquier ángulo y distancia (Aggarwal, 2022). El método de Wavelet image scattering (WIS) calcula descriptores basados en matrices de co-ocurrencia (Bruna et al., 2013). Puede compararse con las convoluciones de una red neuronal profunda, se puede considerar como un filtro pasa banda basado en altas frecuencias o detalles de una imagen, también como un filtro de escalamiento pasa bajas que permite recuperar las bajas frecuencias. Después de obtener los vectores de características mediante los métodos extracción de textura, se utilizaron algoritmos basados en modelos de Inteligencia Artificial y Redes Neuronales Artificiales para su respectiva clasificación. Finalmente se evaluaron los modelos de clasificación y redes neuronales. Se comparó el desempeño de los modelos con los vectores LBP, GLCM y WIS y se obtuvieron las métricas de exactitud, precisión, sensibilidad, especificidad y la medida F1. Se clasificaron imágenes de plataformas multimedia en tiempo real, de esta manera distintas compañías pueden contar con sistemas de clasificación que faciliten la navegación y recomendación de contenido para los usuarios.

2. Métodos.

En esta sección se muestran conceptos y técnicas llevadas a cabo para la clasificación de imágenes multimedia de mosaicos y descriptores.

2.1 Mosaicos.

La base de datos de mosaicos contiene 157,448 imágenes a color de 1280x720 píxeles, se tomaron 13 plataformas multimedia, además de una clase adicional para imágenes falsas que no corresponden a alguna categoría de plataformas. De cada clase de plataformas se tomaron 4,000 imágenes para entrenar los modelos con un total de 56,000, las imágenes restantes de cada clase se utilizaron para validar los modelos. En la **Fig. 1** se presenta un ejemplo de mosaicos para cada clase, incluyendo la clase falsa.

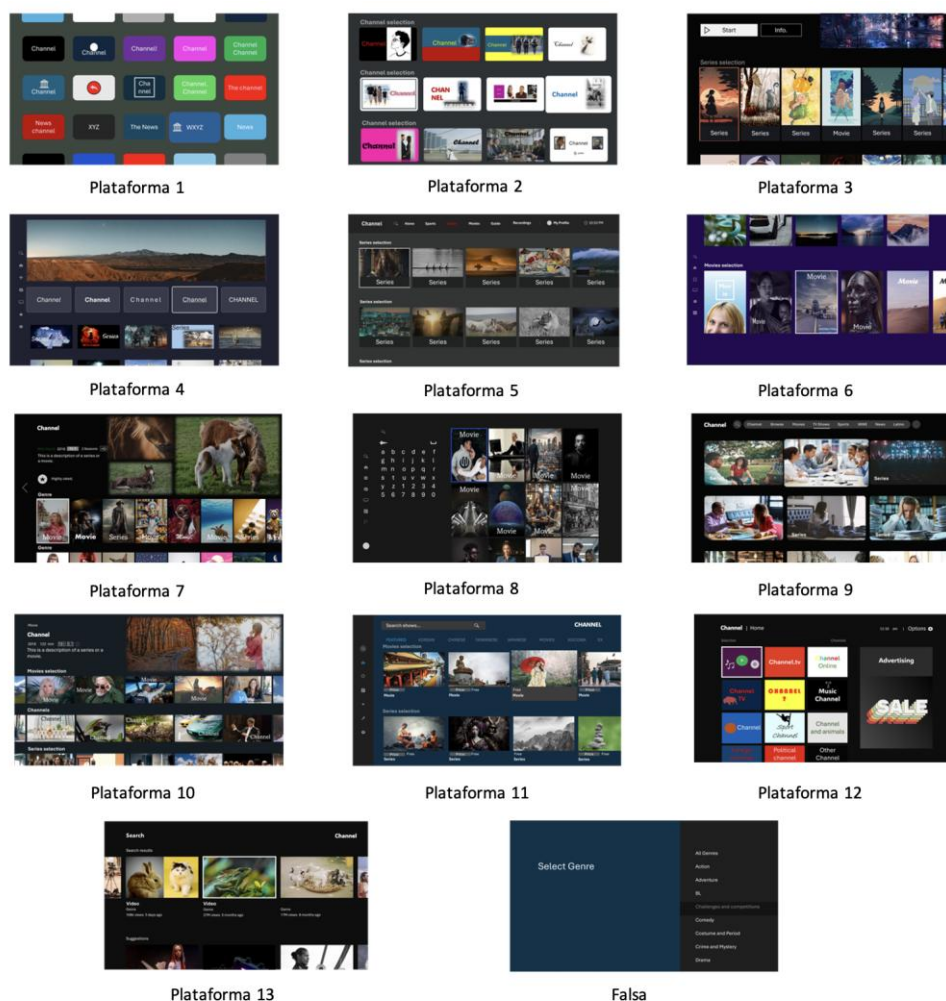
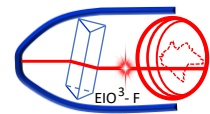


Figura 1. Muestra de imágenes de mosaicos de las 14 clases de plataformas utilizadas.

La distribución las clases para mosaicos se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Distribución por clase de la base de datos de imágenes de mosaicos.

Clases	Entrenamiento	Validación	Total
Plataforma 1	4,000	7,064	11,064
Plataforma 2	4,000	6,540	10,540
Plataforma 3	4,000	7,300	11,300
Plataforma 4	4,000	6,478	10,478
Plataforma 5	4,000	1,994	5,994
Plataforma 6	4,000	6,002	10,002
Plataforma 7	4,000	7,516	11,516
Plataforma 8	4,000	6,524	10,524
Plataforma 9	4,000	6,000	10,000
Plataforma 10	4,000	24,884	28,884
Plataforma 11	4,000	6,000	10,000
Plataforma 12	4,000	5,962	9,962
Plataforma 13	4,000	7,906	11,906
Falso	4,000	1,278	5,278
Total	56,000	101,448	157,448

2.2 Descriptores.

La base de datos de descriptores contiene 38,214 imágenes a color de 1280x720 píxeles, se tomaron 10 plataformas multimedia, además de una clase adicional para imágenes falsas que no corresponden a alguna categoría de plataformas. En la [Fig. 2](#) se muestra un ejemplo de cada una de las clases, el área enmarcada en color rojo corresponde a una región que no presenta variaciones en cada clase. En estas imágenes de descriptores se tomó esa área como característica de cada clase para obtener los patrones de textura.

Para el entrenamiento del modelo se utilizaron 1,000 imágenes de cada clase, tomando en total 11,000 imágenes, las restantes de cada clase fueron utilizadas para validar los modelos.

2.3 Métodos de análisis de texturas.

La textura representa la distribución espacial del nivel de gris de los píxeles en una región de una imagen digital. El análisis de textura tiene un gran desempeño en muchas áreas, una de las funciones principales es obtener características para clasificar y segmentar. Se puede clasificar en métodos estadísticos, métodos estructurales y modelos basados en transformaciones (Armi et. al., 2019). En este trabajo se consideraron métodos estadísticos que se basan en la distribución de intensidad de los píxeles y métodos basados en transformaciones, donde la imagen es transformada a otro espacio mediante una función.

- **Patrón binario local.**

La técnica de análisis estadístico y estructural de Patrón binario local (LBP), obtiene información de las texturas de la imagen. Este método compara cada píxel de una imagen con los píxeles vecinos, tomando una vecindad de 3x3 en toda la matriz de datos de la imagen, comenzando por la esquina superior izquierda y codifica la información de textura local en patrones binarios, de esta manera se obtiene el vector de características para la imagen y se utiliza directamente para la clasificación. Para este trabajo se utilizaron vectores uniformes de 59 elementos para cada imagen.

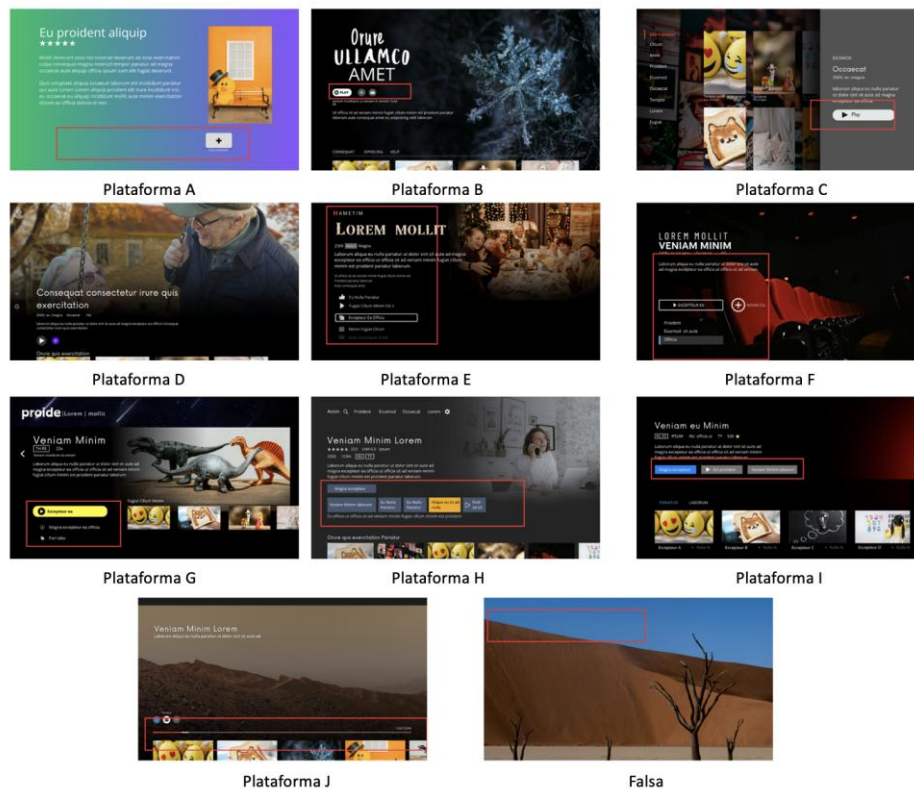
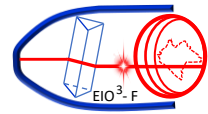


Figura 2. Muestra de imágenes de descriptores de las 11 clases de plataformas utilizadas.

La distribución de las imágenes se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Distribución por clase de la base de datos de imágenes de descriptores.

Clases	Entrenamiento	Validación	Total
Plataforma A	1,000	307	1,307
Plataforma B	1,000	943	1,943
Plataforma C	1,000	633	1,633
Plataforma D	1,000	4,378	5,378
Plataforma E	1,000	4,657	5,657
Plataforma F	1,000	423	1,423
Plataforma G	1,000	4,060	5,060
Plataforma H	1,000	2,130	3,130
Plataforma I	1,000	939	1,939
Plataforma J	1,000	4,744	5,744
Falso	1,000	4,000	5,000
Total	11,000	27,214	38,214



- ***Matriz de coocurrencia de niveles de grises.***

Las características texturales de una matriz de coocurrencia (GLCM) se enfocan en el uso de estadísticas de segundo orden de los histogramas de imágenes en escala de grises. Este método considera parejas de píxeles vecinos que se encuentran separados por una distancia y un determinado ángulo. Estas matrices muestran propiedades de la distribución espacial de la escala de grises de la textura de una imagen. Las medidas de textura GLCM pueden calcularse a partir de la matriz de coocurrencia, en este trabajo se consideran ocho medidas: homogeneidad, contraste, disimilaridad, media, varianza, entropía, segundo momento angular y correlación.

- ***Wavelet image scattering.***

El método Wavelet image scattering (WIS) se basa en una transformación integral que analiza y extrae información de una señal o de una imagen, considera la distribución espacial y de frecuencias. (Grossmann & Morlet 1984). El proceso WIS puede considerarse como un filtrado sucesivo de altas frecuencias o detalles y con la función de escalado, que funciona como un filtro pasa bajas.

2.4 Métodos de clasificación.

Los algoritmos de clasificación de imágenes permiten analizar el contenido de información de imágenes o vectores de características. La tarea principal es clasificar de forma automática nuevas imágenes. Existen diferentes modelos de clasificación, en este trabajo se utilizaron modelos clásicos de aprendizaje supervisado como k-vecino más cercano, árboles de decisión, máquinas de soporte vectorial y Redes Neuronales Artificiales. Estos modelos pueden reconocer y clasificar imágenes de distintas plataformas de manera precisa (EAPA Batista et. al., 2009), (Du et al., 2002), (Song et. al., 2015), (Suthaharan, 2016), (Sastry, 2003), (Principe et al., 2000).

2.5 Métricas de desempeño.

Para conocer el desempeño de los métodos de clasificación, se pueden aplicar diferentes métricas de medición, en este caso se utilizaron las métricas de precisión, exactitud, sensibilidad, especificidad y la medida F1:

$$\begin{aligned}
 \text{Exactitud} &= \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \\
 \text{Precisión} &= \frac{VP}{VP + FP} \\
 \text{Sensibilidad} &= \frac{VP}{VP + FN} \\
 \text{Especificidad} &= \frac{VN}{VN + FP} \\
 \text{Medida F1} &= \frac{2 * \text{Sensibilidad} * \text{Precisión}}{\text{Sensibilidad} + \text{Precisión}}
 \end{aligned}$$

VP (Verdadero Positivo): Corresponde a las instancias en las que el modelo predijo correctamente la clase positiva o afirmativa.

FP (Falso Positivo): Se refiere a aquellos casos en los que el modelo predijo erróneamente la clase positiva, cuando en realidad la instancia pertenecía a la clase negativa.

FN (Falso Negativo): Representa las instancias en las que el modelo falló al predecir la clase positiva, clasificándolas incorrectamente como negativas.

VN (Verdadero Negativo): Engloba las instancias pertenecientes a la clase negativa que fueron correctamente predichas como tales por el modelo.

3. Desarrollo.

Se desarrolló un sistema de clasificación de imágenes en tiempo real, utilizando patrones de textura para identificar la visualización de plataformas multimedia por los usuarios. El Core Meter es un sistema que captura imágenes cada cinco segundos. Para cada imagen se extraen características de textura mediante los diferentes métodos. Los vectores que contienen la textura de imágenes se utilizaron para entrenar los siguientes algoritmos de clasificación k-vecino más cercano, árboles de decisión, máquinas de soporte vectorial y Redes Neuronales Artificiales. El resultado de la clasificación puede ayudar al proveedor para identificar las vistas de los usuarios de alguna plataforma multimedia. En **Fig. 3** se muestra un diagrama general del sistema para clasificar imágenes de plataformas multimedia para mosaicos y descriptores en tiempo real y generación de recomendaciones personalizadas.

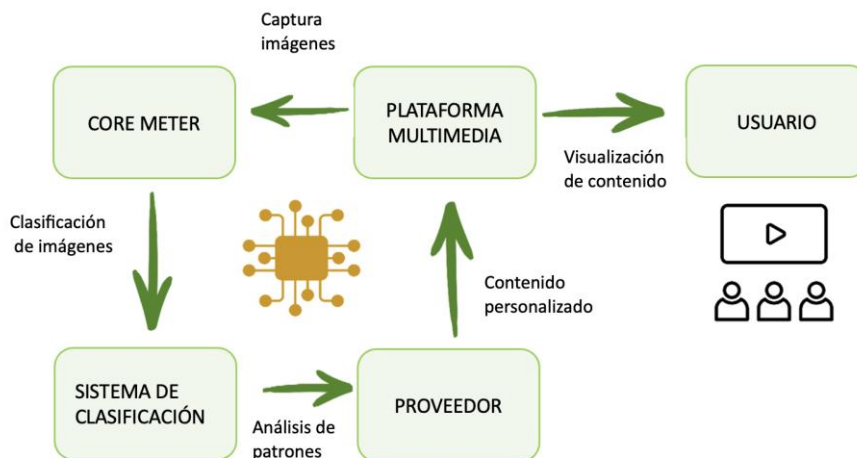


Figura 3. Diagrama general del sistema de clasificación de imágenes de plataformas en tiempo real.

3.1 Modelos clasificación.

Para la clasificación de mosaicos y descriptores se utilizaron los modelos indicados en la **Tabla 3**. Los algoritmos de aprendizaje de máquina solo utilizaron vectores LBP, para el caso de redes neuronales artificiales se utilizaron los vectores de textura LBP, GLCM y WIS.

4. Resultados.

Se obtuvieron resultados del desempeño de los 10 modelos de aprendizaje de máquina usando el vector característico LBP y de redes neuronales artificiales usando los vectores de características LBP, GLCM y WIS. Las métricas empleadas incluyen la precisión, la especificidad, la sensibilidad, la exactitud y la medida F1, tanto para mosaicos como para descriptores.

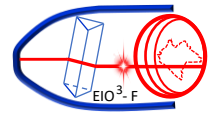


Tabla 3. Vectores característicos de textura utilizados para los modelos de clasificación automática y redes neuronales artificiales.

Modelos de clasificación	LBP	LBP	GLCM
SVM lineal	•		
SVM cuadrático	•		
SVM cúbico	•		
SVM gaussiana fina	•		
SVM gaussiana media	•		
SVM gaussiana gruesa	•		
<i>Ensemble boosted trees</i>	•		
<i>Ensemble bagged trees</i>	•		
<i>Ensemble subspace discriminant</i>	•		
<i>Ensemble subspace KNN</i>	•		
Redes Neuronales Artificiales	•	•	•

A) Mosaicos.

En la **Tabla 4** se presenta la exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los modelos de aprendizaje máquina con vectores de entrada LBP que contienen 59 valores característicos, para clasificar plataformas multimedia de mosaicos. En esta etapa las opciones más relevantes fueron las máquinas de soporte vectorial con kernel cúbico y cuadrático con tiempos óptimos de cómputo. El modelo de máquina de soporte vectorial con kernel cúbico obtuvo el mejor desempeño con precisión media de 98.81% especificidad de 99.94%, sensibilidad 99.25%, exactitud de 99.89% y medida F1 de 99.02%.

Tabla 4. Exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los algoritmos de clasificación para mosaicos.

Modelos	Exactitud	Tiempo (segundos)
SVM lineal	0.968	271.04
SVM cuadrático	0.989	456.09
SVM cúbico	0.989	425.25
SVM gaussiana fina	0.951	792.15
SVM gaussiana media	0.973	512.19
SVM gaussiana gruesa	0.918	724.60
<i>Ensemble boosted trees</i>	0.691	848.08
<i>Ensemble bagged trees</i>	0.960	591.24
<i>Ensemble subspace discriminant</i>	0.892	614.58
<i>Ensemble subspace KNN</i>	0.961	2740.80

En la **Tabla 5** se presenta la exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los modelos de redes neuronales artificiales con vectores de entrada LBP, GLCM y WIS, para clasificar plataformas multimedia de mosaicos. El mejor desempeño lo obtuvo la red neuronal artificial con el método de wavelet image scattering con exactitud de 99.97%, especificidad de 99.99%, sensibilidad de 99.84%, precisión de 99.59%, medida F1 de 99.71.

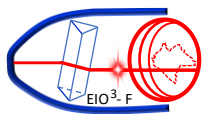


Tabla 5. Exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los algoritmos de clasificación para mosaicos.

Método de extracción de texturas	Características	Exactitud	Tiempo (segundos)
Patrón binario local uniforme	59	0.987	527.99
Matriz de coocurrencia de escala de grises	8	0.937	547.36
Wavelet image scattering	391	0.998	327.54

B) Descriptores.

En la **Tabla 6** se presenta la exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los modelos de aprendizaje de máquina con vectores de entrada LBP que contienen 59 valores característicos, para clasificar plataformas multimedia de descriptores. Los resultados más significativos se obtuvieron con máquinas de soporte vectorial con kernels cuadráticos y cúbicos obteniendo promedios superiores al 98 por ciento en todas sus métricas.

Tabla 6. Exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los algoritmos de clasificación para descriptores.

Modelos	Exactitud	Tiempo (segundos)
SVM linear	0.988	18.676
SVM cuadrático	0.991	18.358
SVM cúbico	0.993	18.482
SVM gaussiana fina	0.934	54.981
SVM gaussiana media	0.987	20.687
SVM gaussiana gruesa	0.927	33.285
<i>Ensemble boosted trees</i>	0.900	45.507
<i>Ensemble bagged trees</i>	0.988	11.309
<i>Ensemble subspace discriminant</i>	0.917	11.094
<i>Ensemble subspace KNN</i>	0.982	132.810

En la **Tabla 7** se presenta la exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de los modelos de redes neuronales artificiales con vectores de entrada LBP, GLCM y WIS, para clasificar plataformas multimedia de descriptores. Para este caso el resultado sobresaliente desempeño sobresaliente se obtuvo con el método de wavelet image scattering con exactitud de 99.90%, especificidad de 99.94%, sensibilidad de 99.58%, precisión de 98.63%, medida F1 de 99.09%.

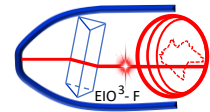


Tabla 7. Exactitud y tiempo promedio de entrenamiento de redes neuronales artificiales para descriptores utilizando los tres metodos de extracción de textura.

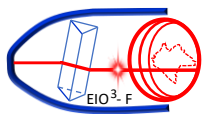
Método de extracción de texturas	Características	Exactitud	Tiempo (segundos)
Patrón binario local uniforme	59	0.989	58.43
Matriz de coocurrencia de escala de grises	8	0.979	97.97
Wavelet image scattering	391	0.999	372.42

Conclusiones.

La Inteligencia Artificial tiene un impacto significativo en la visualización de contenido multimedia para usuarios y empresas que se destacan en plataformas multimedia, mediante sistemas de clasificación de imágenes. Se obtuvo un desempeño con resultados favorables que permiten personalizar las recomendaciones de contenido para el usuario. La obtención de características mediante los métodos LBP, GLCM y WIS mostraron su capacidad para el entrenamiento de los modelos de clasificación automática y redes neuronales artificiales.

Referencias bibliográficas.

- Aggarwal, A. K. (2022).** Learning texture features from GLCM for classification of brain tumor MRI images using random forest classifier. *Wseas transactions on signal processing*
- Armi, L., & Ershad, S. F. (2019).** Texture image analysis and texture classification methods - a review. *CoRR*, abs/1904.06554. <http://arxiv.org/abs/1904.06554>
- Badr, N., Sharaf, S., & Mahrous, A. A. (2024).** Streaming wars: an analysis of the growth and competitive landscape of the subscription video-on-demand services market. *EuroMed Journal of Management*, 6(1), 23–41. <https://doi.org/10.1504/EMJM.2024.135992>
- Bruna, J., & Mallat, S. G. (2013).** Invariant scattering convolution networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(8), 1872–1886. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.230>
- Du, W., Zhan, Z., & Du Zhijun Zhan, W. (2002).** Building Decision Tree Classifier on Private Data. <https://surface.syr.edu/eecshttps://surface.syr.edu/eecs/8>
- EAPA Batista, G., & Furtado Silva, D. (2009).** How k-Nearest Neighbor Parameters Affect its Performance. <http://www.icmc.usp.br/>
- Guerra-Rosas, E., López-Ávila, L. F., Garza-Flores, E., Vidales-Basurto, C. A., & Álvarez-Borrego, J. (2023).** Classification of skin lesion images using artificial intelligence methodologies through radial Fourier–Mellin and Hilbert transform signatures. *Applied Sciences*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/app132011425>
- Jannach, D., Manzoor, A., Cai, W., & Chen, L. (2021).** A Survey on Conversational Recommender Systems. *En ACM Computing Surveys*, 54(5). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3453154>
- Principe, J. C., Euliano, N. R., & Lefebvre, W. C. (2000).** Neural and adaptive systems: Fundamentals through simulations. John Wiley & Sons.
- Sastry, P. S. (2003).** An Introduction to Support Vector Machines. *En Computing and Information Sciences: Recent Trends*.



Song, Y. Y., & Lu, Y. (2015). Decision tree methods: applications for classification and prediction. Shanghai Archives of Psychiatry, 27(2), 130–135. <https://doi.org/10.11919/j.issn.1002-0829.215044>

Suthaharan, S. (2016). Machine Learning Models and Algorithms for Big Data Classification Thinking with Examples for Effective Learning, 36. <http://www.springer.com/series/6157>

Biografía de los investigadores.



Esperanza Guerra Rosas, Obtuvo su licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales y su maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Durango, y su doctorado en Ciencias (Física) en el Departamento de Investigación en Física en la Universidad de Sonora en. Sus áreas de interés incluyen el procesamiento de imágenes, el reconocimiento de patrones y los algoritmos de Inteligencia Artificial. Es miembro de la Academia Mexicana de Óptica y del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII).



Josué Álvarez Borrego, obtuvo su licenciatura en oceanografía física en la Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, México, en 1981, y su maestría y doctorado en Óptica en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México, en 1983 y 1993, respectivamente. Actualmente es Profesor Investigador de la División de Física Aplicada del Departamento de Óptica del CICESE. Sus líneas de investigación incluyen el área de procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones y algoritmos de Inteligencia Artificial. Es miembro de la Academia Mexicana de Óptica y de la Academia Mexicana de Ciencias y de OPTICA (anteriormente OSA), pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII nivel III).

Diseño de un modelo educativo con inteligencia artificial sobre técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo.

Design of an Educational Model with Artificial Intelligence on Techniques for Cultivation, Processing, and Commercialization of Native Corn.

Karina González Izquierdo* (1).

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Villahermosa.

karina.gi@villahermosa.tecnm.mx.

Omar Jiménez-Márquez (2). Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Tlaxiaco,

omar_jm@tlaxiaco.tecnm.mx.

Diana Rubí Oropeza Tosca (3). Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Villahermosa,

diana.ot@villahermosa.tecnm.mx.

Pedro Ramón Santiago (4). Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de La Chontalpa,

pedro.rs@chontalpa.tecnm.mx.

Reiner Rincón Rosales (5). Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,

reiner.rr@tuxtla.tecnm.mx.

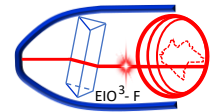
*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 04, 2025; aceptado en octubre 08, 2025.

Resumen.

El presente trabajo se realiza entre el Tecnológico Nacional de México y comunidades productoras de la Ciudad de Tlaxiaco, Oaxaca, con el objetivo de fortalecer las capacidades técnicas y educativas de los productores de maíz nativo mediante un modelo educativo con enfoque intercultural que integra la Inteligencia Artificial como herramienta para la creación de materiales didácticos accesibles, visuales y bilingües (español-mixteco alto). El desarrollo del modelo educativo con Inteligencia Artificial se estructuró en cuatro fases metodológicas: diagnóstico participativo, diseño de materiales, validación comunitaria y difusión digital. En la primera fase se aplicaron entrevistas a 54 productores de maíz de la región. Para la implementación de las fases siguientes se realizaron 47 iteraciones conversacionales durante los meses de marzo y octubre de 2025. Entre los hallazgos más significativos se comprobó que la aplicación de herramientas digitales puede fortalecer significativamente los procesos de enseñanza-aprendizaje en contextos rurales, al permitir la creación de materiales accesibles, bilingües y culturalmente pertinentes. El modelo demostró ser factible, replicable y adaptable a las condiciones de comunidades agrícolas con diversidad lingüística. Se concluye que el modelo educativo basado en IA constituye una herramienta efectiva para integrar la innovación tecnológica con la educación rural intercultural, promoviendo la conservación del maíz nativo y contribuyendo al desarrollo sostenible de las comunidades agrícolas. Este modelo demuestra que la Inteligencia Artificial, aplicada de forma ética y contextualizada, puede contribuir al aprendizaje rural y al aprovechamiento sostenible de recursos naturales, fortaleciendo la organización comunitaria y la conservación biocultural.

Palabras claves: Desarrollo sustentable, IA (Inteligencia Artificial), interculturalidad, maíz nativo, modelo educativo.



Abstract.

The present work is carried out between the Tecnológico Nacional de México (National Technological Institute of Mexico) and producer communities in the City of Tlaxiaco, Oaxaca, with the objective of strengthening the technical and educational capacities of native corn producers through an intercultural educational model that integrates Artificial Intelligence as a tool for the creation of accessible, visual, and bilingual (Spanish–High Mixtec) didactic materials. The development of the educational model with Artificial Intelligence was structured into four methodological phases: participatory diagnosis, materials design, community validation, and digital dissemination. In the first phase, interviews were conducted with 54 corn producers in the region. For the implementation of the following phases, 47 conversational iterations were carried out during the months of March and October 2025. Among the most significant findings, it was confirmed that the application of digital tools can significantly strengthen the teaching-learning processes in rural contexts, by allowing the creation of accessible, bilingual, and culturally relevant materials. The model proved to be feasible, replicable, and adaptable to the conditions of agricultural communities with linguistic diversity. It is concluded that the AI-based educational model constitutes an effective tool for integrating technological innovation with rural intercultural education, promoting the conservation of native corn and contributing to the sustainable development of agricultural communities. This model demonstrates that Artificial Intelligence, applied ethically and contextually, can contribute to rural learning and the sustainable use of natural resources, strengthening community organization and biocultural conservation.

Keywords: AI (Artificial Intelligence), educational Model, Interculturality native corn / heirloom corn, sustainable development.

1. Descripción de la conferencia.

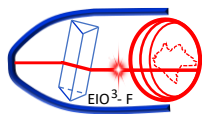
La conferencia presenta los avances del proyecto “Diseño de un modelo educativo con Inteligencia Artificial sobre técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo”, desarrollado en colaboración entre el Tecnológico Nacional de México y comunidades productoras de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco, Oaxaca.

El objetivo principal es fortalecer las capacidades técnicas y educativas de los productores de maíz nativo mediante un modelo educativo con enfoque intercultural que integra la Inteligencia Artificial como herramienta para la creación de materiales didácticos accesibles, visuales y bilingües (español–mixteco alto), siguiendo los principios de la educación contextualizada y las experiencias previas de enseñanza con IA en comunidades agrícolas (Oropeza-Tosca, Jiménez-Márquez, Martínez-Gutiérrez, Lucas-Bravo, & Rincón-Molina, 2025).

Durante la ponencia se presentan los resultados de la primera etapa del proyecto, que incluyó la elaboración de un cuaderno de campo, videos educativos y fichas técnicas bilingües sobre el manejo sustentable del maíz nativo. Estos materiales fueron generados y adaptados con herramientas de Inteligencia Artificial para promover el aprendizaje contextualizado y la apropiación tecnológica en entornos rurales, siguiendo experiencias previas de enseñanza con IA aplicadas a comunidades agrícolas (Oropeza-Tosca, Jiménez-Márquez, Martínez-Gutiérrez, Lucas-Bravo, & Rincón-Molina, 2025).

Asimismo, se expondrá el proceso de difusión comunitaria mediante WhatsApp, a través del cual se formó una red activa de 54 productores que participaron en una demostración práctica del uso de biofertilizantes y bombas de riego. Este tipo de prácticas, basadas en la aplicación de microorganismos benéficos como *Rhizobium jaguaris*, han demostrado mejorar la productividad y la calidad de los cultivos bajo condiciones de campo (Gen-Jiménez., 2025).

Esta experiencia permitió validar la pertinencia cultural y tecnológica del modelo, así como su potencial para ser replicado en otras regiones agrícolas del país. Los resultados se alinean con los enfoques de sustentabilidad e innovación documentados en sistemas agrícolas tradicionales como la milpa mesoamericana, donde la integración de saberes tradicionales y científicos impulsa la resiliencia productiva (Fonteyne, Castillo Caamal, López-Ridaura, & otros, 2023).



La conferencia muestra cómo la aplicación educativa de la Inteligencia Artificial puede fortalecer la transmisión de saberes tradicionales, fomentar la innovación agrícola y contribuir al aprovechamiento sustentable del maíz nativo como patrimonio biocultural, en concordancia con las experiencias de empoderamiento comunitario y desarrollo sostenible reportadas en otras iniciativas rurales mexicanas (Oropeza-Tosca, Escalante-Fernández, Camargo-Santos, Aguiar-Sierra, & López-Cardoza, 2025).

En la **Fig. 1** se muestra la estructura conceptual del modelo educativo diseñado con Inteligencia Artificial, orientado a fortalecer las capacidades de aprendizaje técnico y cultural de los productores de maíz nativo en Tlaxiaco, Oaxaca.

El esquema representa un ciclo de cuatro fases interconectadas, dispuestas en forma circular para reflejar la naturaleza continua y participativa del proceso educativo:

- Diagnóstico participativo. Esta metodología coincide con los enfoques agroecológicos documentados en los sistemas tradicionales de milpa mesoamericana, donde la integración de conocimiento tradicional y científico ha sido clave para la sostenibilidad agrícola (Fonteyne, Castillo Caamal, López-Ridaura, & otros, 2023).
- Diseño inteligente de materiales. Creación de videos, fichas bilingües y cuadernos de campo con apoyo de IA generativa y procesamiento de lenguaje natural para adaptar el contenido a los contextos de la región y a la lengua mixteca. Este enfoque coincide con las estrategias de innovación educativa y fortalecimiento comunitario implementadas en proyectos de resiliencia ambiental y económica en el sureste mexicano (Oropeza-Tosca, Rincón-Molina, Notario-Priego, González-Izquierdo, & Díaz-Rodríguez, 2024).
- Implementación comunitaria. Aplicación de los materiales educativos en campo, acompañada de demostraciones prácticas sobre el uso de biofertilizantes y tecnologías agrícolas accesibles. Para la generación de los materiales se emplearon modelos de procesamiento de lenguaje natural y herramientas de generación visual con IA, que facilitaron la adaptación lingüística y técnica de los contenidos al mixteco alto. Este tipo de aplicación tecnológica ha mostrado resultados exitosos en experiencias educativas rurales similares (Oropeza-Tosca et al., 2025).
- Evaluación y retroalimentación. Revisión participativa de los materiales mediante un grupo de WhatsApp con 54 productores, promoviendo la mejora continua del modelo. Esta estrategia se basa en metodologías de monitoreo participativo digital que han demostrado fortalecer el aprendizaje colaborativo y la interacción entre productores mediante tecnologías móviles en entornos rurales (Oduro, Ngwenya, & Bhengu, 2024; Agnese, 2024).

En el centro del diagrama se observa la integración simbólica entre la Inteligencia Artificial, representada por un nodo tecnológico, y una mazorca de maíz nativo, que simboliza el conocimiento ancestral y el eje biocultural del aprendizaje. Las flechas curvas en tonos verde, amarillo y marrón representan la relación armónica entre tecnología, naturaleza y saberes tradicionales, indicando la continuidad del proceso formativo y su capacidad de replicarse en otras comunidades rurales del país.

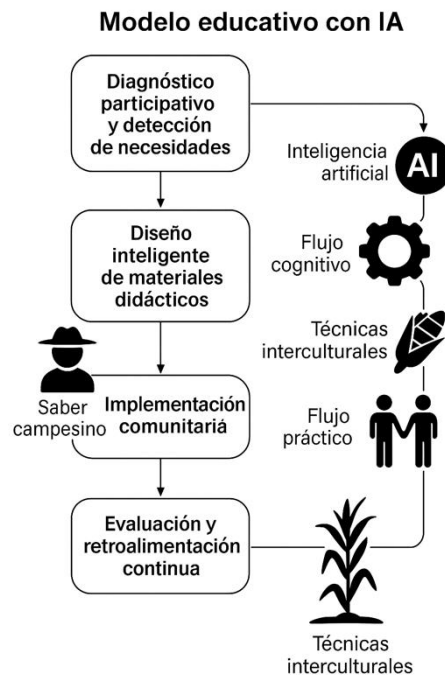


Figura 1. Esquema de la propuesta de modelo educativo con IA.

2. Métodos.

El desarrollo del modelo educativo con Inteligencia Artificial sobre técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo se estructuró en cuatro fases metodológicas: diagnóstico participativo, diseño de materiales, validación comunitaria y difusión digital.

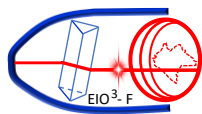
Fase 1. Diagnóstico participativo.

Se aplicaron entrevistas y talleres participativos con productores de maíz nativo de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco, Oaxaca, para identificar necesidades de capacitación, condiciones de cultivo y prácticas tradicionales de manejo. Esta información permitió definir los contenidos prioritarios del modelo educativo intercultural, siguiendo una metodología validada para el diseño de instrumentos cualitativos con apoyo de inteligencia artificial (Oropeza-Tosca, Angles-Falconi, González-Izquierdo, Pérez-Castillo, & Rodríguez-Cruz, 2024).

Fase 2. Diseño de materiales educativos con Inteligencia Artificial.

Durante la segunda fase del proyecto se desarrollaron materiales educativos con el apoyo de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) orientadas a la educación rural y bilingüe. Se elaboraron videos educativos, un video bilingüe (español–mixteco alto) y un cuaderno de campo digital e impreso, todos diseñados para fortalecer las capacidades técnicas y agroecológicas de los productores de maíz nativo.

Los contenidos se estructuraron a partir de guiones contextualizados que integraron conocimientos tradicionales y científicos sobre técnicas de siembra, fertilización biológica, control natural de plagas, selección de semilla y conservación del maíz nativo. Estos guiones fueron procesados mediante IA generativa y herramientas de procesamiento de lenguaje natural, lo que permitió sintetizar información técnica, diseñar materiales visuales



didácticos y adaptar el lenguaje especializado a un formato accesible para productores con distintos niveles de alfabetización.

El uso de la IA facilitó la creación de recursos educativos inclusivos, contribuyendo a la preservación de la lengua mixteca y al fortalecimiento de la identidad cultural de la comunidad. Esta metodología coincide con estudios recientes que demuestran la efectividad de los videos generados con IA frente a los métodos tradicionales de enseñanza (Xu, Zhao, & Li, 2024), y destaca el papel de la IA generativa para desarrollar materiales adaptados a contextos lingüísticos y rurales diversos (Rahim, Ameen, & Hussain, 2025; Escobar Alméciga, Rojas Rodríguez, & Benavides Jiménez, 2025). Además, la implementación tecnológica en comunidades rurales ha sido reconocida como una estrategia clave para cerrar brechas educativas y promover la equidad mediante soluciones de IA accesibles (Zhang & Leong, 2024; Tripathi & Yadav, 2025).

Fase 3. Validación comunitaria.

Los materiales fueron presentados a un grupo de 54 productores de la región del municipio de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco en sesiones demostrativas, donde se aplicaron técnicas de aprendizaje práctico mediante la demostración del uso de biofertilizantes y uso de mochilas aspersoras e insumos agrícolas. La retroalimentación obtenida permitió ajustar los materiales para mejorar su comprensión, pertinencia cultural y utilidad en campo. Esta metodología de validación participativa ha sido ampliamente documentada en estudios de agricultura de campo donde los agricultores participan en la evaluación de tecnologías antes de su difusión (Shah, 2014; Ellis & Paustian, 2024). Además, el uso de videos participativos como herramienta de sistematización de retroalimentación en comunidad ha demostrado ser eficaz para la inclusión de perspectivas contextualizadas en la mejora de los materiales (Kwapong et al., 2024). Estudios de formación participativa en el ámbito pecuario también han evidenciado cómo la retroalimentación de los beneficiarios puede guiar ajustes en protocolos de capacitación (Dione et al., 2020).

Fase 4. Difusión digital y seguimiento.

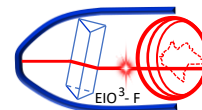
Se creó un grupo de WhatsApp como canal de comunicación continua entre investigadores y productores, donde se compartieron los materiales audiovisuales y se documentaron los avances de adopción de las técnicas aprendidas. Esta red facilitó la transferencia tecnológica, el intercambio de experiencias y la evaluación del impacto educativo del modelo.

El método aplicado combina la investigación participativa (Abad Corpa, 2010), el uso responsable de la Inteligencia Artificial y la integración de saberes tradicionales, garantizando que el modelo educativo sea replicable, inclusivo y contextualizado a las realidades productivas del maíz nativo en regiones de alta diversidad cultural.

La **Tabla 1** presenta la estructura metodológica del modelo educativo diseñado con Inteligencia Artificial, cuyo objetivo es fortalecer las capacidades técnicas y culturales de los productores de maíz nativo en Tlaxiaco, Oaxaca. Cada fase describe el proceso progresivo desde el diagnóstico participativo hasta la validación del aprendizaje, integrando herramientas digitales, materiales bilingües y prácticas de campo.

Tabla 1. Fases del modelo educativo con Inteligencia Artificial para el maíz nativo.

Fase	Descripción general	Actividades principales	Resultados esperados
1. Diagnóstico participativo	Identificación de conocimientos tradicionales, necesidades de capacitación y temas prioritarios sobre el maíz nativo.	Entrevistas y talleres con productores. Registro de prácticas tradicionales. Análisis de condiciones de cultivo.	Definición de contenidos y competencias a fortalecer en el modelo educativo.



2. Diseño inteligente de materiales	Creación de recursos didácticos bilingües con apoyo de IA generativa y herramientas de procesamiento de lenguaje natural.	Elaboración de videos educativos. Diseño de fichas técnicas bilingües - Producción del cuaderno de campo impreso y digital.	Materiales accesibles, visuales y culturalmente pertinentes para la enseñanza agrícola.
3. Implementación comunitaria	Aplicación del modelo educativo en campo con participación directa de los productores de Tlaxiaco.	Demostraciones prácticas con biofertilizantes y bombas de riego. Uso de videos y fichas en talleres. Interacción mediante WhatsApp.	Validación inicial del modelo y adopción de nuevas técnicas de cultivo.
4. Evaluación y retroalimentación	Revisión participativa de los materiales y recopilación de comentarios para su mejora.	Encuestas de percepción. Retroalimentación vía grupo digital. Ajustes lingüísticos y visuales.	Optimización del modelo educativo y fortalecimiento de la red de aprendizaje rural.

La **Tabla 1** sintetiza el proceso formativo continuo que une la innovación tecnológica con los saberes tradicionales del maíz nativo, contribuyendo a un aprendizaje inclusivo y sostenible en comunidades rurales.

El diseño del modelo educativo con Inteligencia Artificial (IA) y los materiales de capacitación para productores de maíz nativo se desarrolló a través de un proceso iterativo de co-creación entre los investigadores y el sistema ChatGPT (modelo GPT-5). Este proceso permitió combinar la sistematización del conocimiento científico con la generación automatizada de materiales educativos adaptados a contextos rurales interculturales. (Del Carmen Jaramillo Flores, 2025)

El algoritmo aplicado siguió una secuencia estructurada de seis etapas principales, en las cuales se documentaron un total de 47 iteraciones conversacionales específicas dedicadas al proyecto del maíz nativo, distribuidas entre los meses de marzo y octubre de 2025. Cada iteración representó un ciclo de refinamiento, validación o ampliación del contenido educativo.

Etapas del algoritmo de diseño colaborativo con IA: Identificación del contexto y objetivos educativos. Se definieron las metas del proyecto, las comunidades participantes (Tlaxiaco, Oaxaca) y el diseño intercultural centrado en el maíz nativo. (Iteraciones: 5 chats)

Diseño conceptual del modelo educativo. Se elaboró el esquema del modelo, sus fases (diagnóstico participativo, diseño inteligente, implementación comunitaria y evaluación) y los ejes temáticos sobre cultivo, procesamiento y comercialización. (Iteraciones: 6 chats)

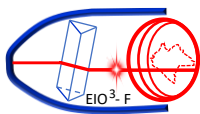
Desarrollo del contenido base con IA. Se generaron textos explicativos, fichas técnicas, resúmenes bilingües, cuadernos de campo y guiones para videos educativos. Cada material fue ajustado con retroalimentación humana y revisiones lingüísticas. (Iteraciones: 12 chats)

Optimización del lenguaje intercultural y accesible.

Se aplicaron modelos de procesamiento de lenguaje natural (PLN) para traducir conceptos técnicos al mixteco alto y simplificar el discurso sin perder precisión científica. (Iteraciones: 5 chats)

Diseño visual y estructural del modelo.

Se generaron diagramas, esquemas y la Figura 1 (Esquema del modelo educativo con IA) utilizando herramientas de generación de imágenes integradas al algoritmo. (Iteraciones: 8 chats)



Validación y compilación final del modelo educativo. Se revisaron la coherencia, el formato de los materiales, la estructura académica y su compatibilidad con un formato para capacitación, garantizando que los contenidos generados con IA pudieran ser utilizados en talleres presenciales y virtuales con productores rurales. Los cuestionarios fueron validados bajo esquema de asamblea comunitaria. (Iteraciones: 11 chats)

Total de iteraciones y naturaleza del proceso. El algoritmo se ejecutó mediante 47 interacciones estructuradas entre investigadores y ChatGPT, lo que permitió generar más de 80 páginas de texto técnico y divulgativo, 3 instrumentos didácticos (cuaderno de campo, fichas bilingües y guiones de video) y 1 esquema visual.

El modelo operativo de este algoritmo puede representarse como un ciclo adaptativo de mejora continua, donde cada conversación actúa como una unidad de aprendizaje para la IA y los investigadores, con retroalimentación inmediata y generación de contenido optimizado en cada iteración.

Guiones de video elaborados para el proyecto del maíz nativo

1. Introducción al maíz nativo y su valor biocultural. Explica la importancia del maíz como patrimonio genético, cultural y alimentario de Tlaxiaco, destacando su vínculo con la identidad y la biodiversidad.
2. Preparación del terreno y selección de semillas nativas. Muestra las técnicas tradicionales para la elección, conservación y siembra de semillas, combinadas con recomendaciones técnicas actuales.
3. Uso y aplicación de biofertilizantes con *Rhizobium jaguaris*. Presenta la demostración práctica de aplicación mediante bomba de riego, con la participación de los productores en campo.
4. Control natural de plagas y manejo ecológico del cultivo. Describe el uso de extractos naturales, rotación de cultivos y estrategias sostenibles de protección del maíz nativo.
5. Cosecha, secado y almacenamiento tradicional del maíz nativo. Documenta las prácticas del municipio en cuanto a cosecha y conservación para mantener la calidad del grano y evitar la pérdida de semilla.
6. Transformación y comercialización del maíz nativo. Explica los procesos de molienda, elaboración de tortillas, tostadas y otros derivados, con valor agregado y turismo sustentable y vivencial.

Formato de los videos:

- Duración promedio: 3 a 10 minutos.
- Idiomas: español y mixteco alto.
- Difusión: grupo de WhatsApp con 54 productores, sesiones presenciales y materiales complementarios del cuaderno de campo.

La **Tabla 2** presenta la síntesis operativa del algoritmo de interacción y predicción desarrollado con ChatGPT, utilizado para el diseño del modelo educativo con IA. Este algoritmo combina técnicas de procesamiento de lenguaje natural (PLN) con programación estructurada en Java, a fin de sistematizar la información recopilada durante el diagnóstico participativo y generar contenidos educativos adaptados a las necesidades detectadas.

El modelo de predicción permitió automatizar la clasificación temática de los datos cualitativos (entrevistas, observaciones y talleres), identificar patrones recurrentes en los discursos comunitarios y proponer secuencias didácticas contextualizadas al entorno de la población receptora. A través de sucesivas iteraciones, ChatGPT analizó la coherencia, el nivel de comprensión lingüística y la pertinencia cultural de los materiales, mientras que la interfaz en Java facilitó la visualización, el almacenamiento y la validación de los resultados intermedios del algoritmo.

De esta manera, la tabla muestra las etapas del flujo operativo: entrada, procesamiento, predicción y salida, las relaciones funcionales entre el análisis automatizado de datos y la generación de productos educativos. Además, la **Tabla 2** explica la integración de tecnología predictiva con razonamiento asistido por IA, lo que demuestra un proceso de innovación educativa que combina análisis de datos, creatividad generativa y validación contextual

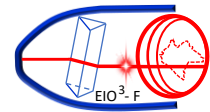


Tabla 2. Síntesis operativa del algoritmo con ChatGPT. Aplicación del modelo de predicción en Java.

Etapas	Acción realizada	Iteraciones (chats)	Productos generados
1	Análisis contextual y objetivos	5	Definición del marco del proyecto
2	Diseño conceptual del modelo	6	Esquema general del modelo educativo
3	Producción de contenidos educativos	12	Fichas, cuaderno de campo, guiones de video
4	Adaptación intercultural y lingüística	5	Versiones bilingües español–mixteco alto
5	Diseño visual con IA	8	Esquema gráfico del modelo (Figura 1)
6	Revisión, validación y síntesis final	11	Documento completo para publicación

3. Desarrollo.

La implementación del modelo educativo con Inteligencia Artificial (IA) se estructuró para fortalecer el aprendizaje técnico y la transferencia de conocimientos agrícolas en comunidades rurales, tomando como base la producción y conservación del maíz nativo en la Heroica Ciudad de Tlaxiaco, Oaxaca. El modelo combina elementos de educación intercultural, aprendizaje activo y asistencia tecnológica con IA para facilitar la comprensión de técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo, respetando los saberes tradicionales y las particularidades lingüísticas de la región. (UNESCO, 2025).

El modelo educativo con IA se compone de cuatro componentes principales:

1. Diagnóstico participativo y detección de necesidades.

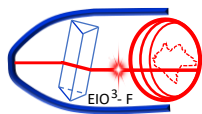
Se realizaron entrevistas y talleres comunitarios para identificar los temas prioritarios de capacitación: selección de semilla, fertilización biológica, control de plagas, almacenamiento y estrategias básicas de comercialización. Este diagnóstico permitió definir las unidades temáticas del modelo educativo. Este enfoque se apoya en metodologías participativas de innovación agrícola documentadas en la literatura, donde involucrar a los productores en la fase de diagnóstico mejora la pertinencia, adopción y contextualización de las intervenciones (Paleologo, Acampora, Barelló, & Graffigna, 2025). También, en estudios de adaptación comunitaria, se ha demostrado que el diagnóstico participativo fortalece la capacidad educativa para planear intervenciones tecnológicas en contextos vulnerables (Sanogo et al., 2017)

2. Diseño inteligente de materiales didácticos.

Se utilizaron herramientas de procesamiento de lenguaje natural (NLP) para generar textos explicativos accesibles y traducirlos al mixteco alto, así como algoritmos de generación de imágenes para crear infografías y secuencias visuales que ilustraran los procesos agrícolas. En educación, el NLP ha sido empleado para adaptar automáticamente contenidos a distintos niveles lingüísticos y contextos culturales (Alhawiti, 2014). Además, en escenarios rurales, la IA generativa y técnicas de traducción automática se están explorando como medios para superar las barreras lingüísticas y mejorar la accesibilidad educativa. Este tipo de estrategias tecnológicas también ha sido propuesto para convertir materiales educativos en dialectos o lenguas originarias, lo que resulta fundamental en contextos multilingües (Zhang & Leong, 2024)

Con estos elementos, se desarrollaron tres productos principales:

- Un cuaderno de campo con estructura modular (planeación, siembra, nutrición y comercialización).
- Videos educativos bilingües generados con apoyo de IA que muestran las técnicas en formato visual.
- Fichas técnicas ilustradas, diseñadas para uso en campo y adaptadas al lenguaje coloquial.



3. Implementación comunitaria.

El modelo fue aplicado con un grupo piloto de 54 productores de maíz nativo, quienes participaron en demostraciones prácticas de biofertilizantes mediante bombas de riego. Los materiales se compartieron mediante WhatsApp, lo que permitió reforzar el aprendizaje fuera del aula y establecer una red horizontal de comunicación entre productores e investigadores. Estudios han documentado cómo WhatsApp puede habilitar intercambio de conocimientos entre agricultores innovadores y fortalecer redes de aprendizaje (Agnese, 2024).

Las sesiones combinaron aprendizaje visual, demostraciones en campo y evaluación participativa de los materiales. Los productores emitieron sugerencias para optimizar tonos visuales, vocabulario y ejemplos didácticos—aunque el ajuste constante fue clave para asegurar pertinencia cultural y utilidad en campo. El uso de plataformas de mensajería instantánea en talleres participativos ha sido estudiado como una estrategia eficaz para facilitar la retroalimentación y adaptaciones iterativas (High et al., 2025; Steinke et al., 2022).

4. Evaluación y retroalimentación continua.

La validación del modelo se basó en la percepción de los productores sobre la aplicabilidad de los materiales, lo que permitió ajustes específicos en vocabulario, ejemplos visuales y temáticas de almacenamiento y comercialización. Este enfoque se alinea con recomendaciones de evaluaciones participativas en investigación agrícola, donde la retroalimentación de usuarios finales es esencial para la mejora continua y la legitimidad del modelo (Campilan, 2022).

En términos tecnológicos, se utilizaron herramientas de IA generativa para automatizar la redacción de contenidos bilingües, crear gráficos educativos realistas y producir videos explicativos en formato accesible para dispositivos móviles. Todo el procesamiento y adaptación de los materiales se realizó en plataformas abiertas y software educativo, priorizando la transferencia de conocimiento y la reutilización libre por parte de las comunidades.

El modelo se representa como un circuito educativo dinámico, en el que la IA actúa como mediadora entre el conocimiento científico y el saber campesino. Este circuito integra tres flujos:

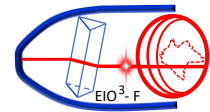
- el flujo cognitivo, donde la IA sintetiza y adapta el contenido;
- el flujo social, donde los productores comparten experiencias mediante medios digitales;
- y el flujo práctico, donde se aplican las técnicas aprendidas en la parcela.

El modelo también promueve una relación simbiótica entre la tecnología y el conocimiento agrícola, similar a la interacción biológica entre rizobios nativos y plantas cultivadas, que mejoran la productividad de manera sostenible (Gen-Jiménez et al., 2025). La implementación permitió observar una mejora en la comprensión de los procesos agrícolas y una mayor apropiación de las tecnologías digitales. El modelo demostró que la combinación de inteligencia artificial, recursos visuales y lengua indígena puede transformar la enseñanza agrícola en comunidades rurales, lo que promueve la conservación del maíz nativo como patrimonio biocultural y promueve la sustentabilidad de la región.

Conclusiones.

Al llevar a cabo el “*Diseño de un modelo educativo con Inteligencia Artificial sobre técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo*” se comprobó que la aplicación de herramientas digitales puede fortalecer significativamente los procesos de enseñanza-aprendizaje en contextos rurales, al permitir la creación de materiales accesibles, bilingües y culturalmente pertinentes (Supelano, 2024; López Costa, 2025; Asprilla, 2025).

El modelo demostró ser factible, replicable y adaptable a las condiciones de comunidades agrícolas con diversidad lingüística, lo que coincide con investigaciones que subrayan el potencial de la IA para reducir brechas educativas en zonas rurales (Zhang & Leong, 2024; Ganchozo-Loor, 2025). Su estructura es sencilla y flexible, lo que facilita su implementación sin requerir infraestructura tecnológica compleja, reforzando la evidencia sobre el uso de IA educativa en entornos con recursos limitados (Han et al., 2025).



Los videos educativos, fichas bilingües y el cuaderno de campo desarrollados con IA fueron comprendidos y valorados por los productores, quienes destacaron su utilidad para mejorar las prácticas de cultivo y el manejo sostenible del maíz nativo. Este hallazgo se alinea con estudios que muestran que la personalización del aprendizaje y la comunicación digital aumentan el compromiso y la apropiación del conocimiento en comunidades rurales (López Costa, 2025; Strielkowski *et al.*, 2025).

La experiencia comunitaria en Tlaxiaco, Oaxaca, evidenció que el uso responsable de la Inteligencia Artificial puede convertirse en un aliado pedagógico para preservar saberes tradicionales, mejorar la productividad agrícola y fortalecer la transmisión intergeneracional del conocimiento.

El algoritmo de co-diseño con IA demostró ser una herramienta eficaz para la creación sistemática de materiales educativos contextualizados, favoreciendo la integración del conocimiento tradicional y la tecnología en comunidades agrícolas. Su carácter iterativo permitió mantener un proceso de mejora continua, logrando un modelo educativo coherente, funcional y culturalmente pertinente, con potencial de replicarse en otras regiones del país.

Se concluye que el modelo educativo basado en IA constituye una herramienta efectiva para integrar la innovación tecnológica con la educación rural intercultural, promoviendo la conservación del maíz nativo y contribuyendo al desarrollo sostenible de las comunidades agrícolas. Este modelo demuestra que la Inteligencia Artificial, aplicada de forma ética y contextualizada, puede contribuir al aprendizaje rural y al aprovechamiento sostenible de recursos naturales, fortaleciendo la organización comunitaria y la conservación biocultural (Oropeza-Tosca, Escalante-Fernández, Camargo-Santos, Aguiar-Sierra, & López-Cardoza, 2025).

Créditos.

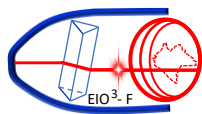
Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el respaldo institucional otorgado para el desarrollo del proyecto “Diseño de un modelo educativo con Inteligencia Artificial sobre técnicas de cultivo, procesamiento y comercialización del maíz nativo”, así como al Instituto Tecnológico de Tlaxiaco, por su colaboración en las actividades de campo y validación comunitaria.

Se extiende un especial agradecimiento a los productores de maíz nativo de la Heroica Ciudad de Tlaxiaco, Oaxaca, quienes participaron activamente en los talleres, demostraciones y validación de materiales educativos elaborados con IA.

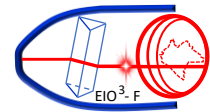
El equipo reconoce también el compromiso de los docentes e investigadores del Instituto Tecnológico de Villahermosa, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, el Instituto Tecnológico de Tlaxiaco, Instituto Tecnológico de La Chontalpa; y, a cada uno de los integrantes de la Red de Investigación de Probióticos Vegetales Rizobianos para una Agricultura Sostenible, por su contribución técnica, pedagógica y metodológica para la aplicación de biofertilizantes y sobre conocimientos del maíz nativo al desarrollo de este modelo educativo intercultural.

Referencias bibliográficas.

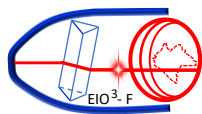
- Abad Corpa, E. (2010).** *La investigación-acción-participativa: Una forma de investigación cualitativa.* Revista Colombiana de Enfermería, 6(3), 52-60. <https://doi.org/10.18270/rce.v6i3.281>
- Agnese, F. (2024).** *Participatory monitoring in farmer field school programs using WhatsApp.* Interactive Learning Environments. <https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2223241>
- Asprilla, A. A. T. (2025).** *Inteligencia artificial herramienta pedagógica en educación primaria en Chocó: Revisión sistemática.* Revista de Salud y Desarrollo Humano, 6(2), 622. <https://doi.org/10.61368/r.s.d.h.v6i2.622>



- Alhawiti, K. M. (2014). *Natural language processing and its use in education*. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 5(12), 72–76. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2014.051210>
- Campilan, D. (2000, December 6–7). *Participatory evaluation of participatory research*. Paper presented at the *Forum on Evaluation of International Cooperation Projects: Centering on Development of Human Resources in the Field of Agriculture*, International Cooperation Center for Agricultural Education (ICCAE), Nagoya University, Nagoya, Japan. International Potato Center (CIP). https://www.betterevaluation.org/sites/default/files/2022-11/39-56_0.pdf
- Del Carmen Jaramillo Flores, P. (2025). *Uso de algoritmos de inteligencia artificial en la creación de materiales educativos*. *Revista Ingenio Global*, 4(1), 250-262. <https://doi.org/10.62943/rig.v4n1.2025.258>
- Dione, M. M., Dohoo, I., Ndiwa, N., Poole, J., Ouma, E., Amia, W. C., & Wieland, B. (2020). *Impact of participatory training of smallholder pig farmers on knowledge, attitudes and practices regarding biosecurity for the control of African swine fever in Uganda*. *Transboundary and emerging diseases*, 67(6), 2482–2493. <https://doi.org/10.1111/tbed.13587>
- Ellis, E., Paustian, K. (2024). *Importance of on-farm research for validating process-based models of climate-smart agriculture*. *Carbon Balance Manage* 19, 16. <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00260-6>
- Escobar Alméciga, W. Y., Rojas Rodríguez, D. H., & Benavides Jiménez, F. (2025). *AI and bilingual education framed within significant learning: A critical reflection*. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/393573039_AI_and_Bilingual_Education_Framed_within_Significant_Learning_A_Critical_Reflection
- Fonteyne, S., Castillo Caamal, J. B., López-Ridaaura, S., & otros. (2023). *Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Mesoamerica*. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1115490. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1115490>
- Ganchozo-Loor, M. V., Párraga-Gallardo, J. L., Alcívar-Cedeño, D. S., & Vera Vera, V. J. (2025). *Inteligencia artificial y aprendizaje significativo en contextos rurales: una revisión crítica de la literatura*. *Innova Science Journal*, 3(2), 56. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n2/56>
- Gen-Jiménez, A., Flores-Félix, J. D., Rincón-Molina, C. I., Manzano-Gómez, L. A., Villalobos-Maldonado, J. J., Ruiz-Lau, N., Roca-Couso, R., Ruíz-Valdiviezo, V. M., & Rincón-Rosales, R. (2025). *Native Rhizobium biofertilization enhances yield and quality in Solanum lycopersicum under field conditions*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 41(4), 126. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04349-z>
- Han, J., Liu, G., & Xiang, S. (2025). *To engage with AI or not: Learning engagement among rural junior high school students in an AI-powered adaptive learning environment*. *Palgrave Communications*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-05676-0>
- High, C., Teleman, H., Narvselius, E., & Boshi, B. (2025). *Building participatory instant messaging: Developing a methodology for online workshops using WhatsApp*. *Journal of Participatory Research Methods*, 6(3), Article 141333. <https://doi.org/10.35844/001c.141333>
- Kwapong, N. A., Whitfield, S., Ambuko, J., Ankrah, D. A., & Swanepoel, F. (2024). *Using participatory videos in understanding farmers' experiences with climate-smart agricultural practices: Reflections from Ghana*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1282993. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1282993>
- López Costa, M. (2025). *Artificial Intelligence and Data Literacy in Rural Schools' Teaching Practices: Knowledge, Use, and Challenges*. *Education Sciences*, 15(3), 352. <https://doi.org/10.3390/educsci15030352>



- Oduro, S. E., Ngwenya, J. C., & Bhengu, T. T. (2024). *Enhancing the effectiveness of teacher learning communities through WhatsApp group-chat technology: Accounting teachers' voices*. South African Journal of Education, 44(Suppl 1). <https://doi.org/10.15700/saje.v44ns1a2439>
- Oropeza-Tosca, D. R., Angles-Falconi, S. I., González-Izquierdo, K., Pérez-Castillo, A., & Rodríguez-Cruz, L. E. (2024). *Metodología para el diseño de entrevistas para medir el impacto de la enseñanza con inteligencia artificial*. Artículos del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Chetumal 2024 El libro Online, 16(4), 1–2, 5, 99–103. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17334703>
- Oropeza-Tosca, D. R., Escalante-Fernández, J. J., Camargo-Santos, O. C., Aguiar-Sierra, R., & López-Cardoza, M. I. (2025). *Desarrollo sostenible y empoderamiento comunitario a través del uso de Atractosteus tropicus*. European Public & Social Innovation Review, 11, 1–14. <https://doi.org/10.31637/epsir-2026-1923>
- Oropeza-Tosca, D. R., Jiménez-Márquez, O., Martínez-Gutiérrez, R., Lucas-Bravo, G., & Rincón-Molina, C. (2025). *Experiential and Sustainable Tourism: Teaching with Artificial Intelligence to Native Corn Producers in Tlaxiaco, Oaxaca*. In Training, Education, and Learning Sciences (Vol. 193). AHFE Open Access. <https://doi.org/10.54941/ahfe1006662>
- Oropeza-Tosca, D. R., Rincón-Molina, C. I., Baptista, A., & Notario-Priego, R. (2024). *Perspective chapter: Development of business in rural southeastern Mexican communities and environmental awareness*. In IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007675>
- Oropeza-Tosca, D. R., Rincón-Molina, C. I., Notario-Priego, R., González-Izquierdo, K., & Díaz-Rodríguez, E. (2024). *Strengthening community resilience in the face of environmental and economic challenges in Southeast Mexico*. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18(10), e291. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-291>
- Paleologo, M., Acampora, M., Barello, S., & Graffigna, G. (2025). *Uncovering the Landscape of Participatory Research in Agricultural Innovation: A Scoping Review*. Citizen Science: Theory and Practice 10(1), 17. <https://doi.org/10.5334/cstp.767>
- Rahim, S., Ameen, K., & Hussain, I. (2025). *Harnessing generative AI: Reviewing applications and challenges in educational contexts*. Education and Information Technologies, 30(2), 187–204. <https://doi.org/10.1016/j.eait.2025.108237>
- Sanogo, D., Ndour, B.Y., Sall, M. *et al.* *Participatory diagnosis and development of climate change adaptive capacity in the groundnut basin of Senegal: building a climate-smart village model*. Agric & Food Secur 6, 13 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40066-017-0091-y>
- Shah, H. (2014). *Assessment of training on participatory technology validation at farmers' fields under CRP (1.1) – Dry land systems Chakwal site, Pakistan (27–29 November, 2014)*. Social Science Research Institute, National Agriculture Research Centre. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33874.45769>
- Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J., & Müller, A. (2022). *Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: Insights from practice*. Agricultural Systems, 195, 103313. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103313>
- Supelano Londoño, M. L. (2024). *The application of Artificial Intelligence in rural education at the University level*. Metaverse Basic and Applied Research, 3, .102. <https://doi.org/10.56294/mr2024.102>
- Tripathi, A., & Yadav, V. (2025). *Leveraging artificial intelligence for rural education: A systematic review of transforming learning opportunities and bridging the urban–rural divide*. Journal of Artificial Intelligence Applications, 3(3), 215–223. <https://doi.org/10.18178/JAAI.2025.3.3.215-223>



- Strielkowski, W., Grebennikova, V., Lisovskiy, A., Rakhimova, G., & Vasileva, T. (2024). *AI-driven adaptive learning for sustainable educational transformation*. Sustainable Development, 33(2), 1921–1947. <https://doi.org/10.1002/sd.3221>
- UNESCO. (2025). *La inteligencia artificial en la educación*. <https://www.unesco.org/es/educación-digital/inteligencia-artificial>
- Xu, T., Zhao, Y., & Li, M. (2024). *From recorded to AI-generated instructional videos: A comparison in effectiveness*. British Journal of Educational Technology, 55(7), 2315–2332. <https://doi.org/10.1111/bjet.13530>
- Zhang, H. L., & Leong, W. Y. (2024). *Transforming rural and underserved schools with AI-powered education solutions*. ASM Science Journal, 19. <https://doi.org/10.32802/asmscj.2023.1895>

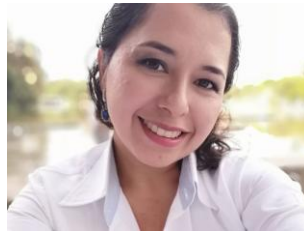
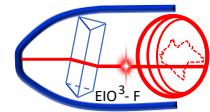
Biografía de los investigadores.



Karina González Izquierdo es licenciada en Administración por el Instituto Tecnológico de Villahermosa y cuenta con una Maestría en Administración por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Actualmente, cursa el Doctorado en Administración en el Instituto Tecnológico de Tijuana, fortaleciendo su formación en gestión organizacional y educativa. Desde el año 2009, se ha desempeñado como profesora en el Instituto Tecnológico de Villahermosa, donde ha impartido diversas asignaturas del área de Ciencias Económico-Administrativas, además de participar como catedrática en la Maestría en Economía Social y Solidaria. En el ámbito administrativo, ha ocupado el cargo de Auditora Interna, realizando auditorías bajo los lineamientos de la norma ISO 19011:2018 enfocada en la ISO 9001:2015. <https://orcid.org/0009-0005-0769-2868>



Omar Jiménez Márquez es Licenciado en Administración, Maestro en Ingeniería y Doctorante en Ciencias del Desarrollo Regional y la Sustentabilidad por El Colegio de Puebla. Originario de Tlaxiaco, Oaxaca, se desempeña como Subdirector Académico del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlaxiaco, donde impulsa la vinculación entre educación, investigación y desarrollo regional. Con más de 20 años de experiencia en docencia y gestión académica, ha liderado proyectos de turismo sustentable, planeación territorial, emprendimiento e inteligencia artificial aplicada a la educación. Es autor y coautor de artículos en revistas nacionales e internacionales, y de capítulos en editoriales como AHFE Open Access y Atena Editora, enfocados en modelos de innovación educativa y desarrollo comunitario sustentable. <https://orcid.org/0009-0000-9399-729X>.



Diana Rubí Oropeza Tosca Es Doctora en Educación por la Universidad OMI Centro de Investigación y Maestra en Educación por la misma institución, es Profesora-investigadora del Instituto Tecnológico de Villahermosa, Tabasco-México. Se distingue por su excelencia académica y profesional. Graduada como la mejor de su clase en todos sus grados obtenidos, ha participado en congresos científicos y ha contribuido en proyectos de investigación significativos. Su habilidad didáctica se refleja en la enseñanza de cursos especializados, promoviendo la innovación tecnológica y el aprendizaje digital. Su compromiso con la educación y el desarrollo continuo en biotecnología. Es Profesora de Tiempo Completo del Instituto Tecnológico de Villahermosa, Candidato al SNII desde el 2024. Ha escrito más de 21 artículos y 2 capítulos de investigación, dirigido y codirigido más de 15 tesis de licenciatura y doctorado en las áreas de educación, ingeniería ambiental, bioquímica e ingeniería petrolera. Ha participado en múltiples congresos nacionales e internacionales, impartido más de 5 módulos de diplomados en educación y múltiples cursos relacionados con educación en inteligencia artificial, desarrollo social e investigación comunitaria. Correo electrónico: oropeza.dianar@gmail.com <https://orcid.org/0009-0007-7330-3167>.



Pedro Ramón Santiago es Doctor en Educación por la Universidad de Guadalajara (UdeG). Maestro en Administración Educativa por la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT). Licenciado en Ciencias de la Educación por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Profesor de posgrado del Instituto de Educación Superior del Magisterio (IESMA-Tabasco), dependencia de la Secretaría de Educación del Estado de Tabasco, Profesor-investigador del Instituto Tecnológico de la Chontalpa (ITECH) y de la Universidad Olmeca de Tabasco. Perfil PRODEP desde el año 2010, Miembros del Sistema Estatal y Nacional de Investigadores Nivel I. Integrante del Cuerpo Académico Consolidado (PRODEP): Investigación e Innovación Educativas. Correo electrónico: pedrosantiagoramon@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-1571-4260>.



Reiner Rincón-Rosales es licenciado en Biología, maestro en Biotecnología y doctor en Ciencias Biológicas por la UNAM, con especialidad en Ecología Genómica. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI Nivel II). Sus áreas de especialización incluyen agricultura regenerativa, ecología genómica, microbiología, biología y biología molecular. <https://orcid.org/0000-0001-8141-2610>

Fibras ópticas ultradelgadas: Revisión de métodos de fabricación y aplicaciones en ingeniería avanzada.

Ultra-thin optical fibers: Review of manufacturing methods and applications in advanced engineering.

Julián Moisés Estudillo Ayala* (1).

Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 km, Salamanca, 36885, México.

julian@ugto.mx.

Juan Carlos Hernández García (2). Investigadoras e investigadores por México SECIHTI Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, Demarcación Territorial Benito Juárez, Ciudad de México, 03940 CDMX, México.

jchernadez@ugto.mx.

Juan Manuel Sierra Hernández (3). Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 km, Salamanca, 36885, México. jm.sierrahernandez@ugto.mx.

Daniel Juaregui Vázquez (4). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), División de Física Aplicada-Departamento de Óptica, Carretera Ensenada-Tijuana, No. 3918, Zona Playitas, Ensenada, 22860, México. djauregui@cicese.mx.

José Roberto Reyes Ayona (5). Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 km, Salamanca, 36885, México. jr.reyes@ugto.mx.

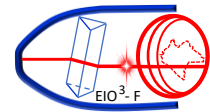
Roberto Rojas Laguna (6). Departamento de Ingeniería Electrónica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5 + 1.8 km, Salamanca, 36885, México. rlaguna@ugto.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 08, 2025; aceptado en octubre 10, 2025.

Resumen.

Este documento presenta una revisión de métodos de fabricación y aplicaciones de fibras ópticas ultradelgadas en ingeniería avanzada. Se enfoca en el estudio de fibras con diámetros reducidos, típicamente entre 1 y 40 μm , y en cómo estas microfibras pueden optimizarse para la detección avanzada de parámetros físicos, químicos y biológicos. La investigación contempla técnicas destinadas a mejorar la sensibilidad, disminuir el tamaño y ampliar el rango operativo de estos dispositivos, y examina diversas aplicaciones y sensores desarrollados en la Universidad de Guanajuato. Se exponen los principios físicos que rigen la propagación de la luz en estas estructuras, incluyendo el aprovechamiento de la onda evanescente y los fenómenos de interferencia. Asimismo, se analizan distintos métodos de fabricación como el de barrido con flama, adelgazamiento por plasma, uso de láser CO_2 y técnicas de arco eléctrico, evaluando sus ventajas y limitaciones para producir microfibras con propiedades específicas. El documento profundiza en las aplicaciones de estas fibras en interferómetros Mach-Zehnder y Sagnac, así como en sensores de



campo magnético, temperatura e índice de refracción detallando los principios que rigen su funcionamiento y los resultados experimentales.

Palabras claves: Fibras ópticas, fibras ópticas adelgazadas, láseres, sensores ópticos.

Abstract.

This document presents a review of manufacturing methods and applications of ultrathin optical fibers in advanced engineering. It focuses on the study of fibers with reduced diameters, typically between 1 and 40 μm , and on how these microfibers can be optimized for advanced detection of physical, chemical, and biological parameters. The research considers techniques aimed at improving sensitivity, reducing size, and expanding the operating range of these devices, and examines various applications and sensors developed at the University of Guanajuato. The physical principles governing light propagation in these structures are presented, including the use of evanescent waves and interference phenomena. Different manufacturing methods are also analyzed, such as flame brushing, plasma thinning, CO₂ laser processing, and electric-arc techniques, evaluating their advantages and limitations for producing microfibers with specific properties. The document delves into applications of these fibers in Mach-Zehnder and Sagnac interferometers, as well as in magnetic-field, temperature, and refractive-index sensors, detailing the principles governing their operation and the experimental results.

Keywords: Optical fibers, optical fibers tapered, optical sensors, lasers.

1. Descripción de la conferencia.

Desde la invención del primer láser las fibras ópticas surgieron con gran interés por las ventajas que mostraron para las comunicaciones ópticas y detección: baja dispersión a larga distancia, inmunidad al ruido electromagnético y costo eficiente por el uso de sílice. Los científicos Kao y Hockham propusieron la guía de onda de vidrio cilíndrica que permitió su aplicación en transmisión de datos. A lo largo de décadas se desarrollaron dispositivos como láseres y amplificadores de fibra (EDFA y ASE), que emplean dopantes de tierras raras para aumentar la intensidad de la luz. Además, las fibras se usan en detección óptica, biodetección y sistemas de seguridad aprovechando su alta sensibilidad para medir cambios en la propagación de la luz con resoluciones nanométricas o picométricas en monitorización en tiempo real.

Las fibras ópticas ultradelgadas, también llamadas Tapers, fibras cónicas o microfibras ópticas, cuando su diámetro alcanza escalas micro o nanométricas, aprovechan las propiedades de guiado de las fibras convencionales, pero con geometrías que aumentan notablemente su interacción con el entorno. Al disminuir el diámetro de la sección transversal en la región cónica, aumenta la fracción de campo óptico al salir del núcleo e interactúa con medio circundante en forma de onda evanescente (EW) (Taha B., 2021). Este incremento de la EW se traduce en una mayor sensibilidad frente a variaciones del índice de refracción del entorno o a la presencia de sustancias químicas cercanas a la superficie de la microfibra. La sección reducida de la fibra se puede implementar en la detección óptica guiando la luz a través de la fibra óptica y recogiendo para medir la señal transmitida, un proceso conocido como detección extrínseca, o utilizando la fibra microfibra directamente como transductor, un proceso conocido como detección intrínseca.

La implementación de estos dispositivos ópticos se ha vuelto cada vez más atractiva debido a su capacidad para mejorar aún más la EW en la región cónica para medir sustancias químicas específicas cubriendo una fina capa metálica (por ejemplo, oro) y un medio dieléctrico (por ejemplo, capas receptoras) como sensores basados en la resonancia plasmónica superficial (SPR) (Navarrete M., 2013). Los tapers comenzaron a utilizarse en la década de 1980, a medida que los científicos se dieron cuenta de que, al reducir el diámetro de la fibra, se podía incrementar la interacción entre la luz y el entorno mediante la onda evanescente, como ya se menciona esta técnica permite que los tapers actúen como sensores ópticos extremadamente sensibles, detectando incluso cambios mínimos en el índice de refracción.

2. Fibras ópticas ultradelgadas.

Una fibra óptica adelgazada o estrechada es una fibra con dimensiones reducidas a lo largo de una sección específica de una fibra monomodo (SMF) como se muestra en la **Fig. 1**. Existen varios métodos para reducir el diámetro de la fibra, que se mencionan a continuación y se describen en detalle en este artículo: 1) barrido de flama; 2) plasma; 3) láser de CO₂; 4) microcalentador cerámico; y 5) arco eléctrico. Estas técnicas para adelgazar la fibra emplean calentamiento, alcanzando temperaturas superiores a 1900 °C.



Figura 1. Ilustración de una fibra óptica adelgazada (Granados-Zambrano, 2024).

Los parámetros a considerar en una fibra adelgazada son las magnitudes que la definen: el diámetro de su cintura (región más adelgazada), la longitud del estrechamiento y el perfil de la región de transición. Si el estrechamiento se realiza adecuadamente, se puede conseguir un nivel de pérdidas muy bajo, de modo que la mayor parte del campo guiado por la fibra atraviesa la fibra óptica adelgazada.

La parte adelgazada la dividiremos en tres secciones (**Fig. 2**):

Fibra sin estrechar: se refiere a la fibra sin modificación alguna.

Transiciones cónicas: el segmento en el que la fibra disminuye desde el tamaño estándar de la SMF hasta la cintura se denomina «transición descendente», mientras que la «transición ascendente» es el segmento en el que las dimensiones de la fibra aumentan desde la cintura hasta la SMF.

Cintura: esta sección corresponde al diámetro más pequeño, que permanece constante a lo largo de la región cónica.

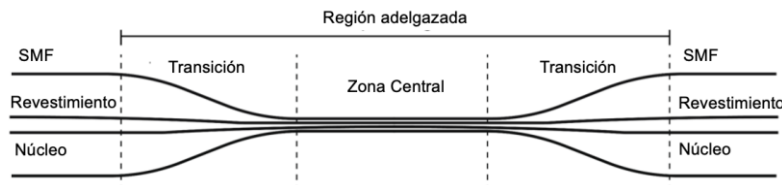
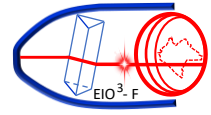


Figura 2. Regiones de una fibra óptica adelgazada (Granados-Zambrano, 2024).

Una fibra óptica adelgazada (cónica) se considera adiabática si el ángulo de transición en una sección de fibra cuya geometría (diámetro del núcleo y/o del revestimiento) cambia gradualmente a lo largo de una cierta longitud de forma suficientemente lenta para que la luz que se propaga permanezca en el mismo modo (o en un conjunto controlado de modos) sin acoplarse a modos no deseados o radiación garantizando pérdidas de potencia mínimas. Dentro de una conicidad adiabática de una fibra monomodo, los campos y la constante de propagación pueden describirse con precisión mediante los del modo fundamental local, que conserva la potencia durante la propagación (Love J., 1991). Por el contrario, un adelgazamiento (cónico) se considera no adiabático si el ángulo de inclinación de las transiciones cónicas es lo suficientemente abrupto como para excitar modos de orden superior, lo que garantiza que el acoplamiento se produzca principalmente entre el modo fundamental de la fibra sin adelgazamiento y los dos primeros modos de la guía de ondas adelgazada (Black R.J, 1991), lo que da lugar a pérdidas de propagación del modo.



3. Propagación y Propiedades de las fibras ópticas ultradelgadas.

El modelo matemático de una fibra óptica adelgazada se muestra en la **Fig. 3**, en la que se tiene que los índices de refracción de la fibra adelgazada y del material de revestimiento son n_1 y n_2 , respectivamente, y el radio de la fibra adelgazada es a .

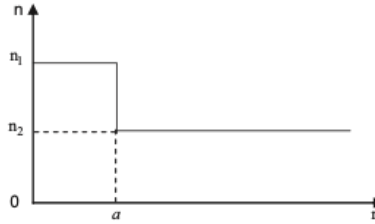


Figura 3. Perfil de índice de una fibra óptica adelgazada (Tong L., 2012).

El perfil de índice del sistema de guía de ondas se expresa entonces como:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 < r < a \\ n_2, & a \leq r < \infty \end{cases} \quad (1a)$$

Para materiales de la micro fibra no absorbentes, las propiedades de la guía de onda pueden obtenerse resolviendo analíticamente las ecuaciones de Helmholtz:

$$\begin{aligned} (\nabla^2 + n^2 k^2 - \beta) \vec{e} &= 0 \\ (\nabla^2 + n^2 k^2 - \beta) \vec{h} &= 0 \end{aligned} \quad (1b)$$

Donde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ es la longitud de onda de la luz en el vacío y β es la constante de propagación.

Gracias a la sección transversal circular de la microfibras, la **Ecuación 1** puede resolverse analíticamente en coordenadas cilíndricas, con ecuaciones de eigenvalores:

HE_{vm} y EH_{vm} modos

$$\left\{ \frac{J'_v(U)}{U J_v(U)} + \frac{K'_v(W)}{W K_v(W)} \right\} \left\{ \frac{J'_v(U)}{U J_v(U)} + \frac{n_2^2 K'_v(W)}{n_1^2 W K_v(W)} \right\} = \left(\frac{v\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{V}{UW} \right)^4 \quad (2)$$

Los modos TE_{0m}

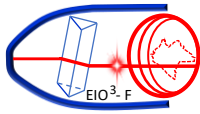
$$\frac{J_1(U)}{U J_0(U)} + \frac{K_1(W)}{W K_0(W)} = 0 \quad (3)$$

Los modos TM_{0m}

$$\frac{n_1^2 J_1(U)}{U J_0(U)} + \frac{n_2^2 K_1(W)}{W K_0(W)} = 0 \quad (4)$$

Donde J_v es la función de Bessel de primera clase, y K_v es la función de Bessel modificada de segunda clase, y $U = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$, $U = a(\beta^2 - k_0^2 n_1^2)^{1/2}$, $V = k_0 a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$.

Resolviendo numéricamente las **Ecuaciones 2 y 3**, se pueden obtenerse los modos guiados (β) soportados por la fibra óptica adelgazada. Por lo general, cuando su diámetro se aproxima o es inferior a la longitud de onda de la luz guiada, una microfibras óptica con un índice de refracción de revestimiento bajo (por ejemplo, vacío, aire o agua) ofrece propiedades inusuales, como un gran confinamiento óptico, campos evanescentes elevados y grandes dispersiones de guía de ondas que pueden ser adaptables, que ofrecen nuevas oportunidades para manipular la luz a micro o nano escala.



3.1. Confinamiento óptico estrecho.

El confinamiento óptico estrecho permite el guiado de ondas ópticas con un pequeño radio de curvatura, lo que facilita el guiado de ondas de bajas pérdidas a través de curvas cerradas. Además, presenta un área de modo pequeño, lo que ofrece ventajas para el desarrollo de dispositivos ópticos con caminos ópticos cortos y/o bajo consumo de energía. Por otro lado, el área de modo pequeña y la mejora del campo generada por el confinamiento estrecho sugieren un enfoque prometedor para lograr efectos ópticos no lineales de bajo umbral o baja potencia (Leon-Saval, 2004).

Los campos evanescentes fuertes permiten una interacción de campo cercano fuerte y/o rápida entre la luz guiada y el entorno, lo que ofrece una detección óptica de la fibra óptica adelgazada con alta sensibilidad y/o respuesta rápida (Villatoro J, 2005), además de facilitar el acoplamiento evanescente entre una fibra óptica adelgazada y otra guía de ondas. Especialmente, el acoplamiento evanescente convierte a las fibras adelgazadas en anillos/lazos/bobinas en cavidades ópticas a microescala para sensores ópticos (Shi L., 2007) y láseres (Jiang, 2007). Una fibra óptica adelgazada de guía de ondas también puede proporcionar campos evanescentes con gradiente pronunciado, que pueden generar una gran fuerza de gradiente para el atrapamiento óptico y pozos de potencial suficientemente profundos para el atrapamiento y guiado de átomos fríos. Además, dentro de un cierto rango espectral, la potencia fraccional de los campos evanescentes (que se propagan fuera de la fibra) depende fuertemente de la longitud de onda de la luz guiada o del diámetro de la fibra, lo que indica la posibilidad de modificar significativamente la velocidad de grupo de los modos guiados, y dar lugar a una dispersión de la guía de ondas grande o manejable en funcionamiento monomodo (Lou, 2006).

4. Técnicas de fabricación de fibras ópticas ultradelgadas.

En esta sección describiremos de forma corta las técnicas para adelgazar fibras ópticas que son las siguientes:

4.1. Barrido de flama.

La técnica de calentamiento por barrido con flama es muy versátil, ya que permite fabricar fibras ópticas adelgazadas con buenas propiedades físicas. La conicidad se obtiene estirando la fibra mientras se calienta con la flama, lo que ablanda el vidrio y reduce su diámetro a lo largo de unos pocos milímetros o centímetros. El núcleo se adelgaza en la misma proporción que el conjunto de la fibra. Este método emplea principalmente un soplete de oxibutano, un microcontrolador para la mezcla de gases y una plataforma lineal con motores paso a paso y soportes para las fibras (Fig. 4). La mezcla de gases se realiza en la cámara del soplete. El flujo de aire de la llama se mantiene en un nivel bajo y la temperatura es suficiente para calentar y ablandar la sílice. Aumentar la presión de oxígeno eleva la temperatura, pero puede apagar la flama por debilitamiento rápido del gas combustible; además, un flujo de aire excesivo puede flexionar la fibra caliente e incrementar significativamente la pérdida por inserción en la fibra cónica.

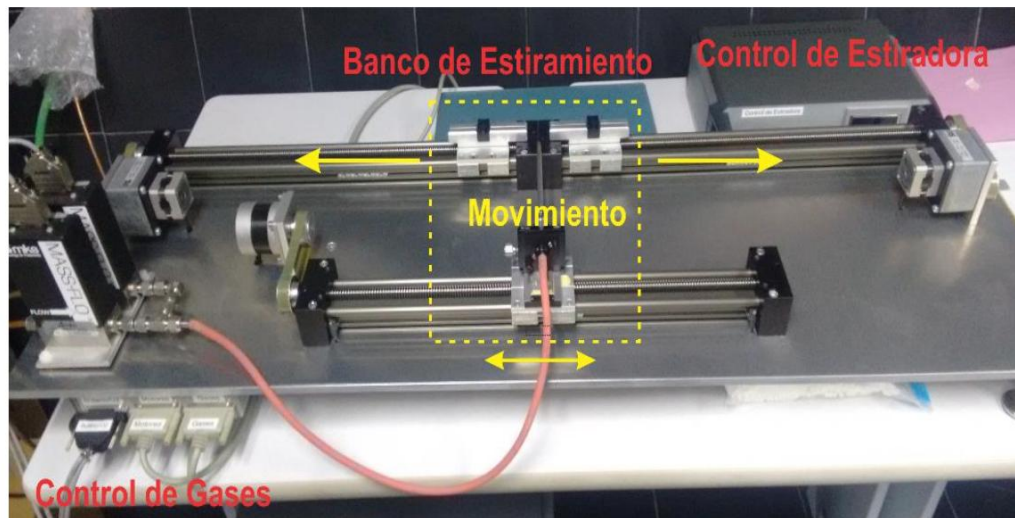


Figura 4. Fotografía de de la MFEOA utilizada en el laboratorio de fibras ópticas de la Universidad de Guanajuato.

La Máquina de Fabricación de Fibra Óptica Adelgazada mediante Fusión y Estiramiento (MFEOA) está compuesta por dos módulos principales: el banco de estiramiento y el módulo de control, ver **Fig. 5**. El banco de estiramiento alberga los elementos mecánicos de estiramiento, sujeción y el quemador necesario para la fabricación de fibras ópticas estrechadas; sus dimensiones son 1160 mm de largo, 400 mm de profundidad y 10 mm de altura. En él se encuentran tres servomotores: dos dedicados al estiramiento de la fibra (cada uno con motor paso a paso, reductor acoplado, husillo, carro de sujeción y guía lineal; esta disposición es doble y simétrica) y un tercero que mueve el mini-soplete. El quemador consta de un motor paso a paso unido a un husillo que transforma movimiento angular en lineal, un carro que fija el mini-soplete y una guía lineal por donde se desliza dicho carro.

El módulo de control es el sistema electrónico encargado de suministrar tensión a los motores y a los controladores másicos de flujo, además de generar las señales de movimiento y regulación de gas conforme a los parámetros fijados desde el software en la computadora. Para el encendido de la llama se utiliza un cerillo o encendedor; el procedimiento incluye seleccionar y dejar fluir el butano hasta que salga por los orificios del mini-soplete, encender la llama y enriquecerla con oxígeno ajustando el indicador correspondiente. Los valores recomendados en el indicador analógico son 0.7 para butano y 1.2 para oxígeno; la relación flujo/valor analógico es 10 cm³ por cada unidad analógica en condiciones estándar. Se recomienda usar gases de alta pureza para una llama homogénea y estable, ya que el control preciso de la llama es crucial para lograr tapers de calidad y un proceso repetible.



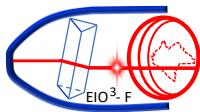
a)



b)

Figura 5. a) imagen del banco de estiramiento de la MFEOA b) imagen de los módulos de control de la MFEOA.

La MFEOA incluye además un software de control compatible con Windows que proporciona un entorno gráfico para introducir los parámetros de fabricación de los tapers y la mezcla de gases del mini-soplete; entre sus menús, destacan las opciones de gestión de gases y del proceso de estirado.



4.2. Adelgazamiento por Plasma.

La fuente de calor utilizada para ablandar la fibra óptica es el plasma, generado por la aplicación de un intenso campo eléctrico entre un par de electrodos de tungsteno. Ese campo ioniza el gas entre los electrodos, en este caso, el aire, creando un gran número de portadores de carga en un medio que, a temperatura ambiente, es un excelente aislante. Así el aire experimenta una transición a un estado conductor, lo que provoca temperaturas extremadamente altas debido al movimiento a gran velocidad de electrones e iones.

Este fenómeno se denomina ruptura eléctrica y es uno de los métodos más comunes para ionizar el aire y generar plasma. El plasma, frecuentemente llamado el cuarto estado de la materia, se diferencia de los estados sólido, líquido y gaseoso. A diferencia de las transiciones sólido-líquido y líquido-gaseoso, que dependen principalmente de la temperatura, el plasma implica la descomposición de las moléculas del gas en átomos y, posteriormente, la separación de esos átomos en electrones e iones positivos.

En la **Fig. 6** el proceso comienza con el desplazamiento de la fibra hacia la derecha; la etapa de traslación derecha se mueve notablemente más rápido para generar el efecto de tracción mientras la fibra atraviesa la zona de plasma. Este método se empleó por la limitada extensión de la región caliente del plasma ($\approx 0,5$ mm) y porque no es posible cepillar el calentador sin provocar perturbaciones que comprometan la estabilidad del plasma. Además, como el plasma supera el umbral de fusión de la sílice (>1200 °C), no es necesario precalentar la fibra antes del estirado: se ablanda de inmediato al entrar en contacto con el plasma.

La distancia L corresponde a la longitud total de la fibra óptica adelgazada, es decir, la distancia que recorre la fibra a través del plasma entre los electrodos. La longitud L y la velocidad de desplazamiento están gobernadas principalmente por la etapa de traslación de mayor rapidez, que determina la velocidad con la que la fibra atraviesa el plasma. Además, antes del estirado, el plasma está apagado cuando la fibra se encuentra en la posición inicial ($L = 0$) y con velocidad $v = 0$.

Estos dos parámetros, según el modelo de Birks 1992, determinan el radio a lo largo de la fibra óptica adelgazada. Dicho modelo solo puede estimar las dimensiones de la fibra en condiciones ideales, como una zona de calentamiento uniforme y conservación de la masa. No obstante, en pruebas experimentales usando la técnica basada en la técnica de plasma, la velocidad v y la longitud del estrechamiento L determinan el radio de la cintura. Si la fibra avanza demasiado despacio hacia el plasma, corre el riesgo de quemarse; por el contrario, si se transporta a demasiada velocidad, las dimensiones del estrechamiento no se formarán correctamente.

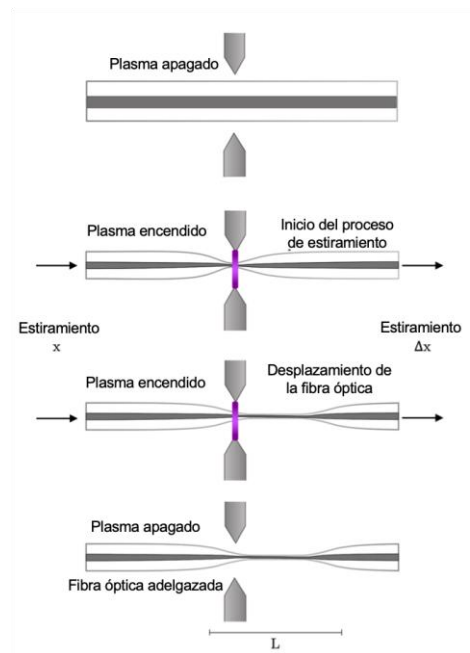


Figura 6. Equipo de adelgazamiento de fibra óptica por pasos (Granados-Zambrano, 2024).

Por tanto, el plasma actúa como un calentador eficaz que ablanda la fibra. En consecuencia, el radio de la sección adelgazada puede reducirse hasta aproximadamente 8 μm de diámetro a lo largo de la zona de adelgazamiento.

El calentamiento por plasma permite obtener adelgazamientos no adiabáticos altamente simétricos, con transiciones cónicas abruptas. El objetivo de esta técnica es ofrecer una alternativa para implementar un calentador capaz de generar transiciones abruptas y adelgazamientos muy simétricos. (Granados-Zambrano et. al., 2024) Construyeron un equipo para adelgazar fibra óptica utilizando la técnica de plasma.

El equipo de adelgazamiento de fibras ópticas propuesto en este trabajo consta de una estructura electromecánica controlada por un circuito, el cual recibe instrucciones operativas desde una computadora. Esta configuración posibilita la cooperación entre sus componentes, resultando en un sistema semiautomático para la fabricación de fibras ópticas adelgazadas. La **Fig. 7** muestra la ilustración del equipo electromecánico y sus elementos: 1) módulo de control del motor; 2) computadora; 3) módulo de plasma; 4) etapas de traslación de vibración ultra baja; 5) guías lineales; 6) motores paso a paso; 7) sección de calentamiento con dos electrodos de tungsteno sujetos por postes ópticos y 8) mesa óptica.

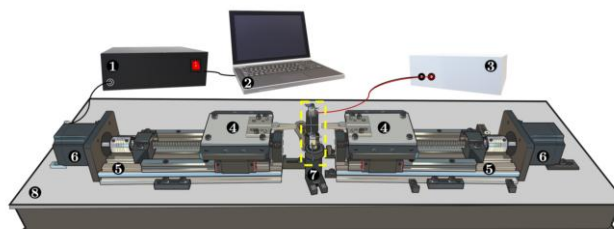


Figura 7. Ilustración del equipo de adelgazadora de fibra óptica (Granados-Zambrano, 2024).

El principio de funcionamiento de la máquina adelgazadora de fibra por plasma comienza tensionando la fibra mediante dos etapas de traslación de baja vibración montadas en un módulo de guía lineal. Las etapas se mueven en la misma dirección, pero la etapa derecha se mueve a una velocidad 35 veces mayor que la plataforma izquierda, cubriendo una distancia 35 veces mayor que la izquierda, para tirar y transportar simultáneamente la fibra a través del plasma (véase la Fig. 4).

Las etapas logran un movimiento lineal preciso mediante la utilización de motores paso a paso estándar de alta precisión que hacen girar un husillo (tornillo sin fin), lo que permite el movimiento bidireccional de las etapas. La plataforma se desliza suavemente sobre dos r lineales metálicos con un bajo coeficiente de fricción, lo que garantiza un movimiento estable y reduce las vibraciones. El movimiento de los motores permite al usuario definir la distancia de recorrido lineal deseada de las etapas con una resolución de $\sim 20 \mu\text{m}$ mediante la utilización del controlador de micro pasos TB6600. Este controlador amplifica la resolución del movimiento angular del motor, lo que aumenta la resolución de la distancia lineal. La aceleración y la velocidad de las etapas se pueden personalizar en el código de programación, donde la aceleración desempeña un papel crucial en el proceso de fabricación de fibras ópticas adelgazada. Cuando la acción de tracción se realiza a una velocidad mayor, las dimensiones del diámetro de la cintura se reducen significativamente. Por el contrario, si la tracción se realiza a una velocidad menor, el diámetro de la cintura disminuye menos. La aceleración dicta esencialmente la velocidad de ejecución del movimiento, y optar por la mayor aceleración posible. Durante el proceso de tensión de la fibra, un módulo de conmutación de voltaje cero (ZVS) que utiliza una bobina Tesla genera plasma induciendo alto voltaje ($>10 \text{ kV}$), descargas que ionizan el aire entre un par de electrodos de tungsteno. La fibra se fija con un imán de neodimio en la ranura en V, colocando la sección de fibra desnuda entre los electrodos de tungsteno (véase la Fig. 4), que actúa como zona de calentamiento donde se genera el plasma, con temperaturas que superan los 2000 grados Celsius (Hauer B., 2014). Este calor extremo ablanda eficazmente la fibra, lo que posteriormente permite reducir su diámetro a medida que se estira, dando como resultado una estructura bicónica o fibra óptica adelgazada y mecánicamente estable.

En la Fig. 8a se muestra los elementos que componen la adelgazadora de fibra óptica de plasma: a) fibra óptica, b) electrodos de tungsteno, c) imanes de neodimio y d) ranura en V, e) plataformas, f) guía lineal y g) husillo (tornillo sin fin). En la Fig. 8b del lado derecho se muestra los electrodos con el plasma encendido de la máquina adelgazadora de fibra óptica.

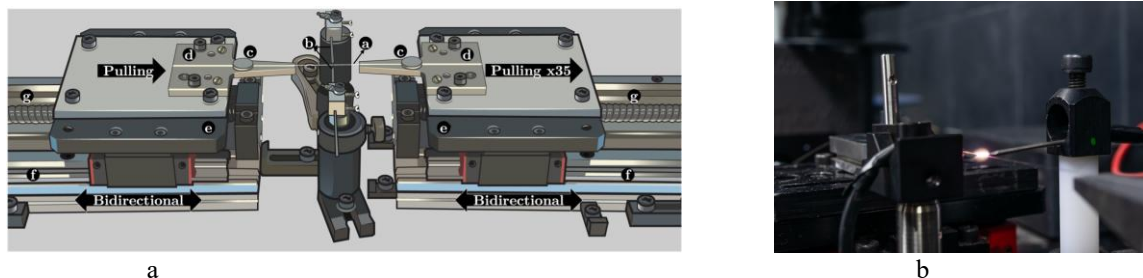


Figura 8. a) Elementos que componen la máquina adelgazadora de Plasma, **b)** Fotografía del plasma generado y electrodos de la máquina adelgazadora de plasma.

4.3. Adelgazamiento por la técnica láser de CO_2

Este método utiliza un láser de CO_2 que funciona como una fuente de calor eficiente: al dirigir su radiación hacia la fibra, se produce absorción y ablandamiento local. Este procedimiento evita problemas de contaminación, ya que los residuos de combustión se eliminan rápidamente durante el proceso, y permite una respuesta térmica rápida y un control preciso de la temperatura mediante la aplicación ajustada de voltaje (Hidayat H., 2023), (Ward et al., 2006) reportaron que el diámetro mínimo obtenido mediante calentamiento con láser de CO_2 fue de $3\text{--}4 \mu\text{m}$. En el proceso de fabricación, ni la potencia de salida ni la capacidad de escaneo del haz a través de la fibra se ven afectadas por

corrientes de aire u otras condiciones ambientales adversas. La temperatura del haz láser suele oscilar entre 1500 y 2000 K (Grellier, 1998), según la potencia empleada. No obstante, cabe destacar que la implementación de esta técnica requiere una inversión inicial muy elevada en el láser de CO₂ y que su operación exige un estricto cumplimiento de las normas de seguridad, dado que se trata de un láser de clase 4. En la Fig. 9 se muestra el arreglo experimental para adelgazar fibras ópticas por la técnica del láser de CO₂, además del láser se utiliza un espejo para enviar el haz en dirección a la fibra óptica que se quiere adelgazar, el ángulo del espejo se varia barriendo la longitud de la fibra que se desea adelgazar, los extremos de la fibra se tensionan para obtener una velocidad de adelgazamiento mayor.

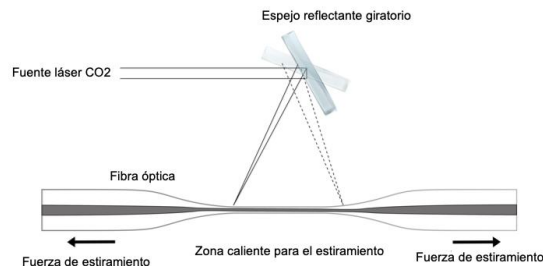


Figura 9. Arreglo experimental para adelgazar fibras ópticas por la técnica del láser de CO₂.

4.4. Adelgazamiento de fibras por el método arco eléctrico.

Existen varias máquinas para empalmar fibra óptica en el mercado que incorporan la capacidad de adelgazar la fibra; algunas tienen costos muy elevados. Entre las marcas destacan Fujikura® y Fitel®. Estas unidades emplean un sistema complejo de cámaras y electrodos que alinean automáticamente las fibras mediante dos etapas de traslación. De este modo se genera, entre los electrodos, una descarga de arco eléctrico que crea una zona de calentamiento eficaz para adelgazar las fibras ópticas. La Fig. 10a muestra el proceso de aplicación de la descarga de arco eléctrico para adelgazar la fibra óptica. La traslación de los electrodos o de la fibra permite cubrir mayor longitud, ya que el arco es reducido y alcanza solo unos pocos milímetros por paso. El arco eléctrico pasa a estado de plasma, ioniza el aire y crea una fuente de calor eficaz, con temperaturas cercanas a los 2100 °C.

Las fibras adelgazadas por el método de arco eléctrico con empalmadoras presentan algunas limitaciones: por ejemplo, los taper son cortos, con longitud de cuello de aproximadamente 0,1 mm y longitud total de alrededor de 1 mm, mostrando transiciones muy abruptas; en algunos casos, los parámetros fundamentales no se controlan adecuadamente. En la Fig. 10b se muestra la imagen de un taper realizado con una empalmadora FITEL V2000; se observa que el adelgazamiento de la fibra no es simétrico ni uniforme.

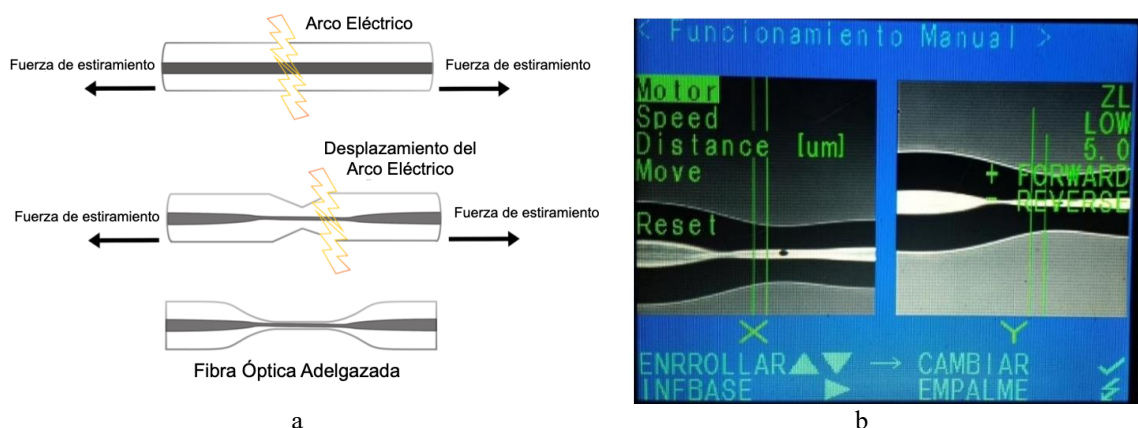


Figura 10. a) diagrama del proceso de aplicación de la descarga de arco eléctrico, b) Fotografía de una fibra adelgazada obtenida con una empalmadora FITEL V2000.

5. Aplicaciones de las fibras ópticas adelgazadas en ingeniería avanzada.

5.1. Fabricación de interferómetros Mach-Zehnder.

La estructura y el tamaño de las fibras ópticas las hacen muy útiles en el área del sensado. Al someter la fibra a deformaciones como curvatura, torsión o tensión, se producen cambios en las características de la luz que se propaga (amplitud, fase, polarización, entre otros). Para aumentar la sensibilidad de los sensores, una estrategia eficaz es reducir el diámetro de la fibra mediante adelgazamiento y emplear configuraciones interferométrías. Al disminuir el diámetro se incrementa la sensibilidad del dispositivo. A continuación, se muestran interferómetros Mach-Zehnder (MZI) fabricados con fibras ópticas adelgazadas.

La **Fig. 11** muestra un esquema del principio de operación del interferómetro fabricado con dos fibras adelgazadas. La primera hace la función de espejo semitransparente (como en el caso de un interferómetro Mach-Zehnder con espejos), de modo que se generan dos ondas una reflejada y otra transmitida que posteriormente se recombinan, formando el patrón de interferencia.

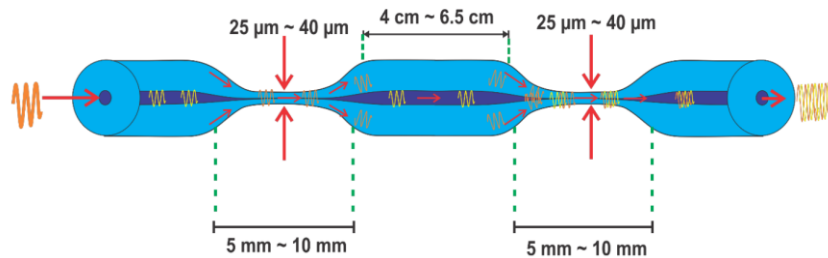


Figura 11. Principio de Operación de un Interferómetro Mach- Zehnder fabricado con doble fibra óptica adelgazada (Hernández-Robles. 2017).

Para entenderlo mejor, si lo analizamos por secciones: en la primera fibra óptica adelgazada se produce la separación de los haces, ya que en ella los modos del revestimiento son excitados desde el modo central, para posteriormente ingresar a una sección de la fibra óptica sin adelgazar que actúa como el brazo del interferómetro. Antes de que el modo central y los modos del revestimiento lleguen a la segunda fibra adelgazada, los diferentes modos generados poseen distintas fases, lo que origina una diferencia de fase modal. En la segunda fibra adelgazada se lleva a cabo la recombinación del modo del núcleo y los modos del revestimiento, produciendo interferencias modales.

La intensidad de transmisión del MZI puede ser expresada por:

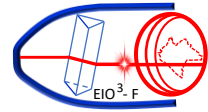
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (5)$$

Donde I_1 , I_2 son las intensidades del modo del núcleo y el modo del revestimiento; $\Delta\phi$ es la diferencia de fase entre el modo del núcleo y el modo del revestimiento, la cual puede ser definida como:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_{eff}^{core} - n_{eff}^{cl}) L \quad (6)$$

donde λ_0 es la longitud de onda central; n_{core} y n_{cl} son los índices de refracción efectivos del modo del núcleo y el modo del revestimiento, respectivamente y L es la longitud del brazo del interferómetro.

Son los índices de refracción efectivos del modo del núcleo y el modo del revestimiento, respectivamente y L es la longitud del brazo del interferómetro. La longitud del brazo del interferómetro y el índice de refracción efectivo del modo de revestimiento de orden m cambiarían con los parámetros del entorno externo, como la temperatura, la tensión y el índice de refracción, lo que da como resultado variaciones de interferencia del MZI.



5.2. Sensor de temperatura con interferómetro Mach–Zehnder de dos fibras adelgazadas concatenadas.

Se realizó una prueba aplicando temperatura a un interferómetro de doble fibra adelgazada, fabricado experimentalmente con la máquina de flama. Para ello se usó un control de temperatura desarrollado en la Universidad de Guanajuato, que consta de un peltier. El peltier es el encargado del aumento y la disminución rápida de la temperatura; tiene la limitación de registrar un máximo de 50 °C, pero permite aplicar temperaturas desde 25 °C. Estas variaciones de temperatura se controlan mediante Arduino y una PC.

Para realizar las mediciones se utilizó un diodo láser fijo con una potencia de 300 mW, correspondiente a la potencia de saturación de la fibra dopada con erbio. En el experimento se colocó el interferómetro fabricado con tapers de diámetro de cintura de 25 μm , 5 mm de longitud y 4 cm de separación en el control de temperatura con peltier para calentar y enfriar rápidamente. En la Fig. 12 se presenta el gráfico característico del comportamiento del interferómetro en su forma espectral. A continuación, se aumentó la temperatura en pasos de 5 °C hasta 50 °C en ambas direcciones para observar el comportamiento tanto en calefacción como en refrigeración. Los 50 °C constituyeron la temperatura límite del peltier utilizado.

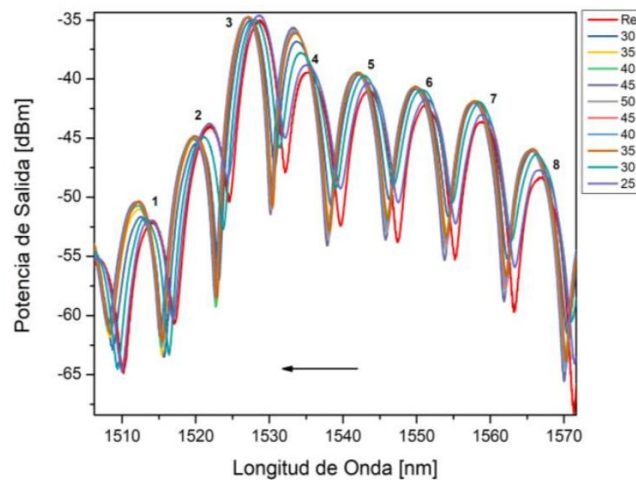


Figura 12. graficas características con diferentes temperaturas con desplazamiento hacia la izquierda. (Hernández-Robles, 2017).

Se observó un desplazamiento de fase y de amplitud hacia la izquierda, como se muestra en la Fig. 12. Podemos elegir diferentes longitudes de onda porque los picos de atenuación presentan prácticamente la misma profundidad y anchura. Se puede mejorar el experimento optimizando el control de temperatura y aumentando el rango térmico, dado que en la industria se usan temperaturas mayores; teóricamente, una de las características de las fibras ópticas es que pueden soportar temperaturas más altas para otros tipos de aplicaciones de detección. mostrando el comportamiento, tanto al momento de aplicar la temperatura, como al momento de enfriarse, esto para ver si el cambio provocado es recíproco, es decir que el desplazamiento provocado al momento de aplicar la temperatura sea el mismo a la hora de retornar a su estado normal, y se pueda concluir que realmente el sensor esté funcionando, la Fig. 13a, muestra una comparación del comportamiento en diferentes franjas seleccionadas. Se realizó una prueba de potencia con respecto a la temperatura es mostrada la Fig. 13b, donde se puede apreciar el comportamiento lineal del sensor presentado, obteniendo un ajuste de regresión lineal de 0.98388.

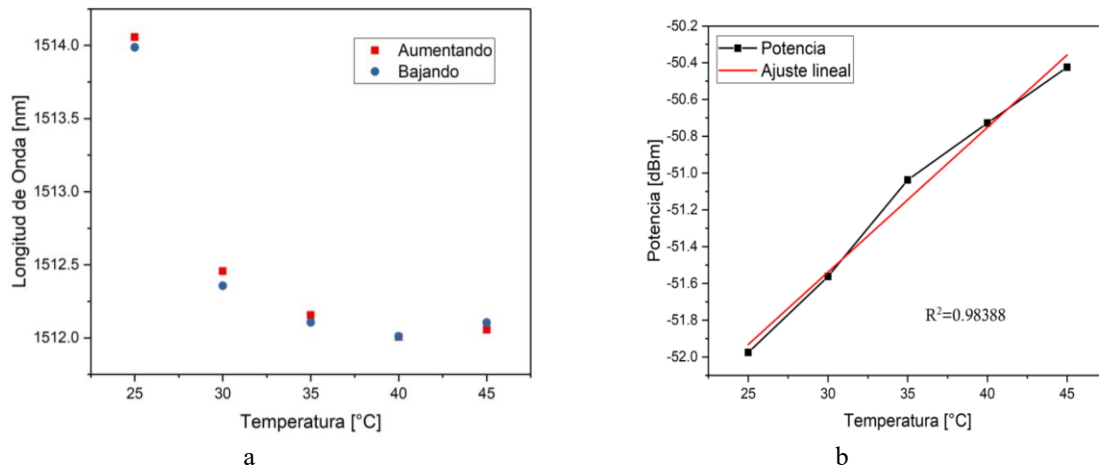
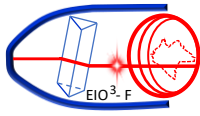


Figura 13. a) Longitud de onda contra temperatura, al aplicar aumentos y disminución de temperatura, **b)** Potencia contra temperatura, con ajuste lineal.

5.3 Detección de Campo Magnético con fibra óptica adelgazada

El campo magnético se usa en aplicaciones cotidianas y a veces es necesario medirlo. Algunos de los primeros intentos de detectar el campo magnético consistieron en analizar los efectos de polarización y los cambios de intensidad generados al deformar una fibra monomodo utilizando un material magnético sensible externo. Estos trabajos utilizan un material externo que responde cuando se aplica un campo magnético. De hecho, los trabajos contemporáneos combinan materiales especiales con interferómetros Fabry-Perot (FPI) o láseres de fibra lineales para proponer un sensor de campo magnético. En este trabajo proponemos un método alternativo de procesamiento de señales para detectar cualquier parámetro físico que modifique la fase, se introducimos el término «fibra óptica biconical» para referirnos a la fibra óptica adelgazada y enfatizar que nuestros dispositivos constan de dos transiciones (en vez de una) y una cintura. Para validar el método, estudiamos un sensor de campo magnético basado en una fibra óptica de doble conicidad (BTOF). El diseño, que opera en modo reflexión, se coloca sobre una cinta magnética económica y de reducido espesor como se muestra en la [Fig. 14](#). Nuestro sensor es compacto requiere solo un centímetro de fibra e insensible a variaciones de polarización, por lo que resulta apropiado para aplicaciones fuera del laboratorio. El campo magnético aplicado alcanza hasta 30 mT mediante un imán permanente desplazable sobre la cinta magnética. La flexión inducida en el BTOF alteró el índice de refracción efectivo de los modos involucrados, y el perfil del índice de refracción puede aproximarse según el radio de curvatura, R_c , mediante (Taylor H. F., 1984, [Yao L., 2009](#)):

$$n(R_c) = n_s \left(1 + \frac{x(1+x)}{R_c} \right) \quad (7)$$

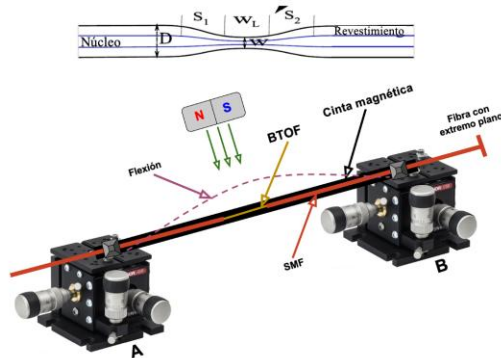


Figura 14. Diagrama esquemático de la configuración experimental. El campo magnético se modifica acercando o alejando un imán permanente de la cinta magnética. (Herrera-Piad L, 2017).

Donde n_s representa el índice efectivo de la longitud de la fibra adelgazada recta, la deformación se aplica a lo largo del eje x , χ es el coeficiente óptico de deformación ($-0,22$ para la sílice) y R_C es el radio de curvatura. El cambio máximo del índice de refracción estimado a partir de la **Ecuación 7** es del orden de $0,0004$. La **Fig. 15** muestra la respuesta de reflexión de interferencia BTOF cuando se aumenta el campo magnético en la cinta magnética. Observamos un desplazamiento uniforme de la longitud de onda en todo el espectro. El desplazamiento al rojo de la forma de onda se atribuye a la disminución de la flexión de la fibra y al radio de curvatura R_C . Como resultado, la diferencia de fase aumenta a medida que aumenta el campo magnético.

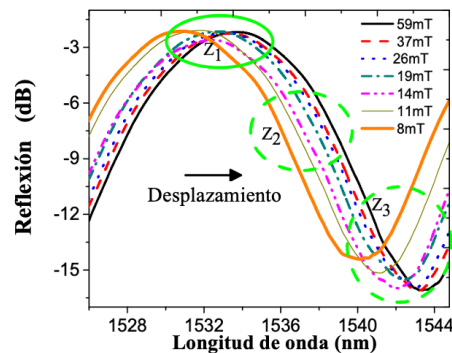


Figura 15. Respuesta de reflexión de interferencia BTOF cuando se aumenta el campo magnético en la cinta magnética. (Herrera-Piad, 2017).

Para detectar el campo magnético, se propone un método alternativo de análisis de señales que emplea la frecuencia espacial dominante extraída del espectro de señales. En nuestro caso, utilizamos la frecuencia espacial de interferencia centrada en 5 nm^{-1} , la cual se encuentra en ambos BTOF fabricados, mostrando frecuencias centradas similares. Además, este pico se mantiene prácticamente constante en frecuencia, presentando solo ligeras variaciones en su intensidad. Dichas variaciones no son lineales y cualquier cambio puede atribuirse al campo magnético aplicado.

Para visualizar los cambios inducidos por el campo magnético en el espectro de longitud de onda de BTOF, filtramos el segundo componente en Fourier (véase la **Fig. 16a**) y se extrae su fase. Posteriormente, trazamos esta fase para una longitud de onda específica de forma arbitraria (véase la **Fig. 16b**). Como se observa en dicha figura, los incrementos en el campo magnético se identifican claramente por los cambios en la fase, y además, la sensibilidad del método no depende de la región marginal del espectro.

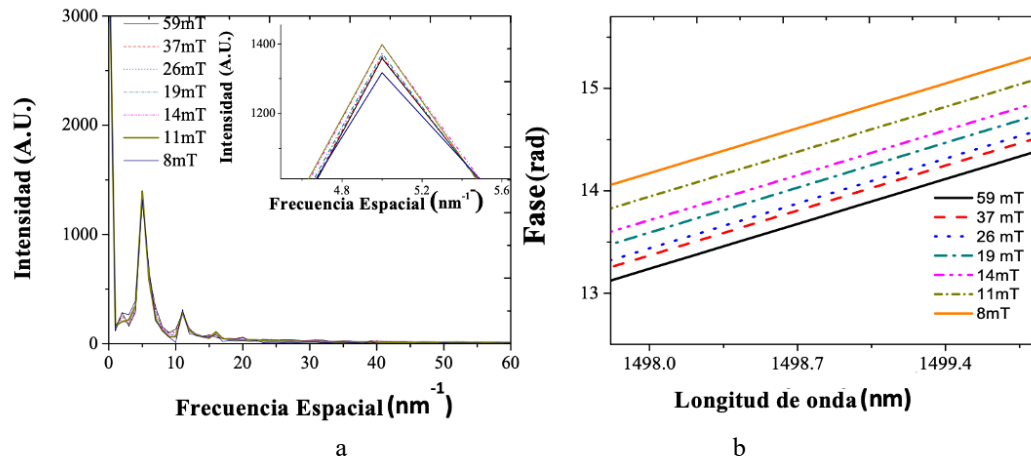


Figura 16. a) Espectro de frecuencia espacial para BTOF cuando se aplica un campo magnético; **b)** Cambios de fase del componente de Fourier filtrado de BTOF cuando se aumenta el campo magnético (Herrera-Piñat, 2017).

5.4 Interferómetro de Sagnac con fibra óptica adelgazadas para detectar cambios en índice de refracción en líquidos.

Uno de los dispositivos de fibra más utilizados en el área de sensores es el interferómetro de Sagnac (IS). El interés por determinar con alta precisión el índice de refracción de líquidos responde a aplicaciones como el control de calidad en industrias químicas y alimentarias, sensores de concentración y salinidad, detección de contaminantes o biomoléculas, monitorización de procesos microfluídicos y mediciones científicas de propiedades ópticas de fluidos. En este trabajo desarrollamos un interferómetro de Sagnac en fibra que incorpora una sección de fibra adelgazada situada en el centro del lazo (Fig. 17). Primero fabricamos fibras ultradelgadas con diámetros menores a 10 μm mediante los métodos de flama y plasma; estas fibras fueron caracterizadas y, al observar franjas de interferencia, se colocaron en el centro del lazo del IS para incrementar la sensibilidad del sensor.

El montaje experimental consta de un diodo láser de bombeo a 980 nm acoplado a un WDM y empalmado a una sección de fibra dopada con erbio para generar una fuente de amplio espectro ($\sim 1500\text{--}1600\text{ nm}$) a partir del ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission). A la salida de la fibra dopada se conectó un acoplador 70/30; la fibra adelgazada se situó en el lazo del IS y la salida se dirigió a un analizador de espectro óptico. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la Fig. 18.

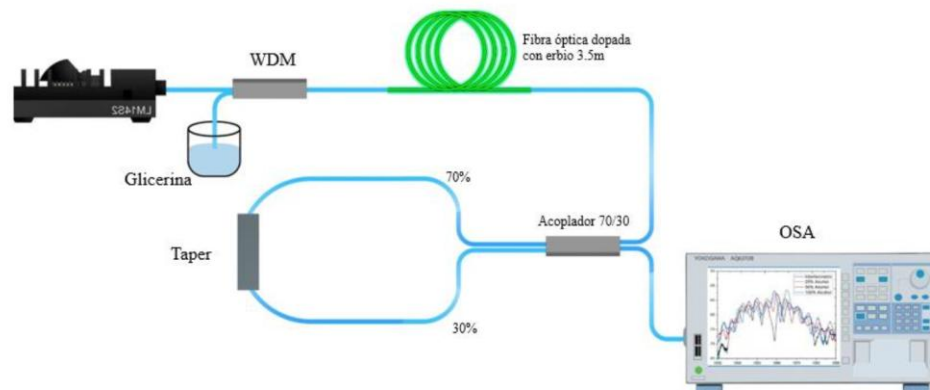
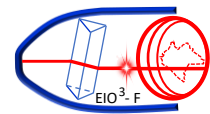


Figura 17. Arreglo experimental para detectar cambios en el índice de refracción en soluciones de agua y alcohol (Cano-García, 2025).



En la gráfica de la **Fig. 18** se presentan los cambios en el espectro de transmisión a la salida del interferómetro de Sagnac, donde la fibra óptica adelgazada fue fijada y sumergida en diferentes soluciones y concentraciones de alcohol. Estos cambios se deben a la variación del índice de refracción para cada solución.

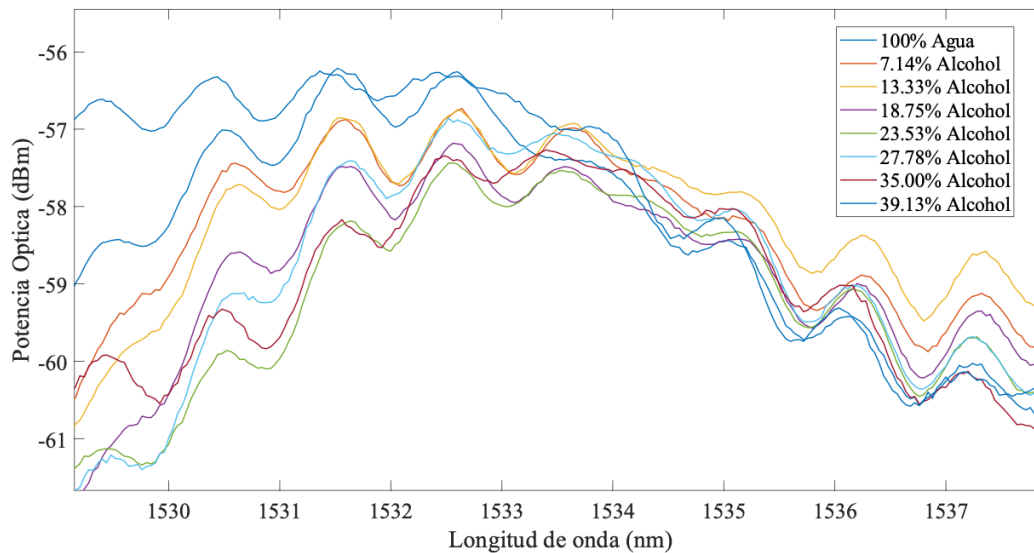


Figura 18. Espectro de salida del arreglo experimental de la **Fig. 17** al cambiar la concentración de la solución agua alcohol (Cano-García, 2025).

Con los resultados obtenidos que se muestran en la **Fig. 18** se analizó en la longitud de onda de 1533nm obteniendo las variaciones de potencia contra concentración de alcohol se observa en la gráfica de la **Fig. 19a** una variación lineal descendiente con forme se incrementa la concentración de alcohol esto demuestra que el dispositivo puede detectar cambios en potencia, así como en longitud de onda al variar el índice de refracción. Se utilizó un refractómetro comercial para medir el índice de refracción, se muestra la gráfica de índice de refracción contra la concentración de alcohol.

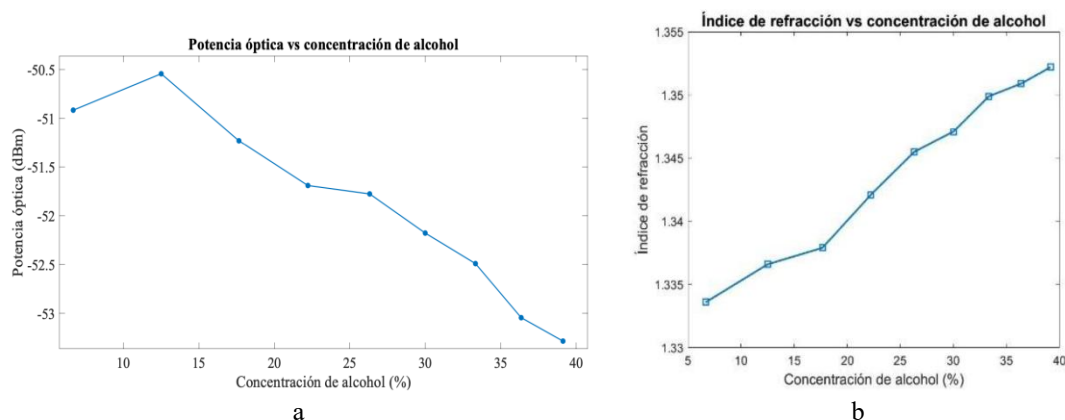
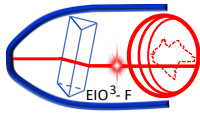


Figura 19. a) Comportamiento de la potencia óptica frente a la concentración de alcohol para el sensor de fibra adelgazada a una longitud de operación de 1533 nm. B) Índice de refracción contra concentración de alcohol para 1553.nm

En la **Fig. 19a** se observa una clara tendencia decreciente en la potencia óptica reflejada a medida que aumentaba la concentración de alcohol. Esta relación se ajustó mediante una regresión lineal con una pendiente de $-0.081 \text{ dBm}/\%$, lo que indica que por cada 1% de incremento en la concentración de alcohol, la potencia óptica reflejada disminuye aproximadamente 0.081 dBm. Esta pérdida de potencia puede atribuirse al aumento del índice de refracción del medio,



lo cual modifica las condiciones de interferencia dentro del sensor y genera una mayor atenuación óptica, ya sea por desajuste modal o por cambios en el acoplamiento de fase.

Conclusiones.

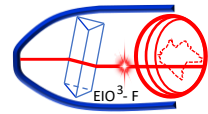
Presentamos una revisión sobre las fibras ópticas ultradelgadas destacando la importancia en la ingeniería avanzada, mostramos cuatro métodos para adelgazar fibras con el fin de dar opciones para fabricar las fibras ópticas ultradelgadas para aplicaciones en áreas de sensado, óptica no lineal y micro resonadores, el método de flama logra hacer fibras adelgazadas del orden de 10 cm de longitud y 1 micra de diámetro de cuello, tiene algunas desventajas debido a que se vuelven frágiles al manipularlos, las fibras adelgazadas con plasma se elaboran hasta con 2 cm de longitud y 8 micras de diámetro de cuello pero son más robustas al manipularlas. Las fibras adelgazadas fabricadas con empalmadora para unir fibras son más difíciles para conservar los parámetros de fabricación y por lo tanto las fibras adelgazadas no son muy uniformes, esto provoca que los espectros sean irregulares. El método que mostró mejores características como menos pérdidas en la transmisión y espectros más uniformes fue el método de plasma, esto se debe a que el plasma alcanza mayores temperaturas al fabricarlas. Mostramos que las fibras adelgazadas pueden tener aplicaciones en diferentes parámetros como sensor de temperatura, sensor de campo magnético, de índice de refracción en líquidos, sensores de curvatura y tensión. Las fibras ópticas ultradelgadas tienen un futuro en aplicaciones biológicas, plasmónica, micro cavidades, Optomecánica, generación de supercontinuo, óptica no lineal entre otras aplicaciones importantes.

Créditos.

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías campus Irapuato-Salamanca y departamento de Ingeniería Electrónica laboratorio de fibras ópticas.

Referencias bibliográficas.

- Black, R. J., Lacroix, S., Gonthier, F., & Love, J. D. (1991).** *Tapered single-mode fibres and devices. ii. experimental and theoretical quantification.* <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135698329>
- Birks, T. A., & Li, Y. W. (1992).** *The shape of fiber tapers.* *Lightwave Technology, Journal*, 10(4), 432–438. doi:[10.1109/50.134196](https://doi.org/10.1109/50.134196)
- Cano-García K. L. (2025).** *Fabricación y diseño de dispositivos de fibra óptica para aplicaciones de Sensado óptico*, Tesis: Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato
- Grellier, A. J. C., Zayer, N. K., & Pannell, C. N. (1998).** *Heat transfer modelling in CO₂ laser processing of optical fibres.* *Optics Communications*, 152(4), 324–328. doi:[10.1016/S0030-4018\(98\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(98)00164-3)
- Hernández-Robles E.A. (2017).** *Investigación de Estrechamiento en Fibras Ópticas para Aplicaciones de Sensado Óptico* Tesis: Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato
- Herrera-Piad, L., Haus, J., Jauregui-Vazquez, D., Sierra-Hernandez, J., Estudillo-Ayala, J., Lopez-Diequez, Y., & Rojas-Laguna, R. (2017).** *Magnetic Field Sensing Based on Bi-Tapered Optical Fibers Using Spectral Phase Analysis.* *Sensors*, 17(8), 2393.
- Hidayat, H., Aziz, M. S., Krishnan, G., Johari, A. R., Nur, H., Taufiq, A., Mufti, N., Mukti, R. R., & Bakhtiar, H. (2023).** *Tapered optical fibers using co2 laser and their sensing performances.* *Journal of Physics: Conference Series*, 2432(1), 012013. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2432/1/012013>

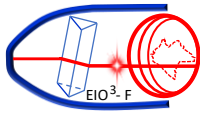


- Hauer, B. D., Kim, P. H., Doolin, C., & et al. (2014).** *On-chip cavity optomechanical coupling*. EPJ Techniques and Instruments, 1(1), 4. doi:[10.1140/epjti4](https://doi.org/10.1140/epjti4)
- Leon-Saval, S. G., Birks, T. A., Wadsworth, W. J., Russell, P. St. J., & Mason, M. W. (2004).** *Optical microfibers and nanofibers: A tutorial*. Optics Express, 12, 2864.
- Love, J. D. (1991).** *Tapered single-mode fibres and devices. Part 1: Adiabaticity criteria*. IEE Proceedings J (Optoelectronics), 138(5), 343–354. <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-j.1991.0060>
- Mart Yeh, R. M., Bachok, N. N., Mashhadany, Y. A., & Arsad, N. (2021).** *Comprehensive review tapered optical fiber configurations for sensing application: Trend and challenges*. Biosensors, 11(8), 2021. doi:[10.3390/bios11080253](https://doi.org/10.3390/bios11080253)
- Navarrete, M. C., Díaz-Herrera, N., González-Cano, A., & Esteban, O. (2014).** *Surface plasmon resonance in the visible region in sensors based on tapered optical fibers*. Sensors and Actuators B: Chemical, 190, 881–885. doi: [10.1016/j.snb.09.066](https://doi.org/10.1016/j.snb.09.066)
- Shi, L., Xu, Y. H., Tan, W., & Chen, X. F. (2007).** *Sensors*, 7, 689.
- Taylor, H. F. (1984).** *Bending Effects in Optical Fibers*. Journal of Lightwave Technology, 2(5), 617–628.
- Tong, L., Zi, F., Guo, X., & Lou, J. (2012).** *Optical microfibers and nanofibers: A tutorial*. Optics Communications, 285(23), 4641–4647.
- Villatoro, J., & Monzón-Hernández, D. (2005).** *Fast detection of hydrogen with nano fiber tapers coated with ultra-thin palladium layers*. Optics Express, 13(13), 5087–5092.
- Ward, J., O'Shea, D., Shortt, B., Morrissey, M., Deasy, K., & Chormaic, S. N. (2006).** *Heat-and-pull rig for fiber taper fabrication*. Review of Scientific Instruments, 77, 05. doi:[10.1063/1.2](https://doi.org/10.1063/1.2)

Biografía de los investigadores.



Julián Moisés Estudillo Ayala, (julian@ugto.mx). Licenciado en Electrónica por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; Maestro y Doctor en Ciencias, con especialidad en fibras ópticas, por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Profesor investigador titular de la Universidad de Guanajuato desde 2001. Sus líneas de investigación incluyen fenómenos no lineales en fibras ópticas, láseres y sensores basados en fibra óptica. Realizó una estancia Sabática en el Centro de Fotónica y Materiales Fotónicos en la Universidad de Bath en Reino Unido. Asesor del capítulo estudiantil IEEE-UG Photonics. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, vigente al 2030.



Juan Carlos Hernández-García, nació en el año de 1982 en Salamanca, Gto. Recibió los títulos de Ing. en Comunicaciones y Electrónica, M. en I. Eléctrica en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (Universidad de Guanajuato, México) en el 2006 y 2009. Finalizó su Doctorado en Ciencias en el Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. (León, Guanajuato) en el 2012. Realizó una estancia posdoctoral en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (Tonantzintla, Puebla) en el 2013. Del 2014 a la fecha, labora en la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca (Universidad de Guanajuato) como personal académico del programa Investigadoras e investigadores por México comisionado por la SECIHTI, desempeñando actividades de investigación y docencia. Sus áreas de investigación abarcan: estudios experimental-numérico con láseres en el régimen CW y pulsado (así como aplicaciones y el uso de nuevas tecnologías), fibras ópticas especiales, interferómetro de Sagnac no lineal en comunicaciones ultrarrápidas, y generación de supercontinuo. Pertenecer al nivel 3 del SNII. Cuenta con la participación en más de 19 proyectos de investigación financiados por el SECIHTI, CIO y la UG. Es autor de 82 artículos en revistas indexadas JCR (con más de 1,600 citas), más de 145 publicaciones en proceeding, 4 capítulos de libros, contando con participación en congresos internacionales y/o nacionales.

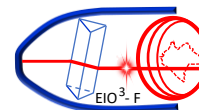


Juan Manuel Sierra-Hernández. Es profesor titular de la Universidad de Guanajuato, campus Irapuato-Salamanca, México. Sus intereses de investigación incluyen sensores de fibra óptica, dispositivos microestructurados de fibra óptica y láseres de fibra óptica. Obtuvo los títulos de máster en Ingeniería y doctor en Ingeniería por la Universidad de Guanajuato en 2011 y 2014, respectivamente.



Daniel Jáuregui Vázquez. Profesor en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, Investigador en óptica y fotónica con experiencia en estudios experimentales y teóricos sobre sensores de fibra óptica y láseres. Diseña sensores de fibra óptica compactos y miniaturizados capaces de detectar múltiples parámetros. Investiga dispositivos basados en cristales fotónicos para desarrollar sistemas de comunicación totalmente ópticos. También participa en el estudio y diseño láseres completamente en fibra para aplicaciones en biología e industria.





José Roberto Reyes Ayona. Es profesor asociado en la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México. Sus áreas de interés en investigación incluyen las líneas de transmisión, la tecnología de microondas, los metamateriales y la propagación de ondas en la materia. Obtuvo la licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, en 2001, así como la maestría y el doctorado en Electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Cholula, México, en 2010 y 2015, respectivamente.



Roberto Rojas Laguna. Es profesor de Cálculo, Álgebra Lineal, Teoría Electromagnética y Aplicaciones de Fibra Óptica en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Guanajuato, campus Irapuato-Salamanca, México. Dirige proyectos sobre sensores de fibra óptica y la simulación de fenómenos no lineales en fibras ópticas.

Instrumentación para detección de astropartículas y clima espacial en la UNACH.

Instrumentation for astroparticles and space weather detection at UNACH.

Karen Salomé Caballero Mora* (1).

Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas (FCFM-UNACH).

karen.mora@unach.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en agosto 22, 2025; aceptado en octubre 03, 2025.

Resumen.

Se presenta una introducción a las astropartículas, seguida de un resumen sobre las distintas técnicas de detección que se utilizan para medirlos, en especial se pone énfasis en las técnicas cultivadas en el Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías de la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas (FCFM-UNACH). Se menciona la técnica de centelleo (Escaramujo), la detección de luz Cherenkov en agua (WCD, LAGO, Auger-SD, HAWC y SWGO), detección con luz de Fluorescencia (FD, Auger), antenas para medir ondas de radio (Auger), satélites y la cámara de placas resistivas (RPC, MATHUSLA). Igualmente se explica en qué consiste el clima espacial y las técnicas usadas en la UNACH para estudiarlo, en especial la técnica con el detector Escaramujo y la antena CALLISTO.

Palabras claves: Astropartículas, clima espacial, detectores, instrumentación, rayos cósmicos.

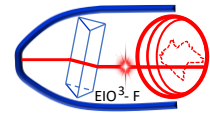
Abstract.

An introduction to astroparticles is presented, followed by a summary of the different detection techniques used to measure them, with special emphasis on the techniques cultivated at the Astrophysics and High Energy Laboratory of the Faculty of Physics and Mathematics of the Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas (FCFM-UNACH). The scintillation technique (Escaramujo), Cherenkov light detection in water (WCD, LAGO, Auger-SD, HAWC and SWGO), fluorescence light detection (FD, Auger), antennas for measuring radio waves (Auger), satellites and the resistive plate chamber (RPC, MATHUSLA) are mentioned. Space weather is also explained, as well as the techniques used at UNACH to study it, especially the technique with the Escaramujo detector and the CALLISTO antenna.

Keywords: Astroparticles, cosmic rays, detectors, instrumentation, space weather.

1. Descripción de la conferencia.

Las partículas elementales son los constituyentes de la materia y no están constituidas por partículas más pequeñas ni se conoce que tengan estructura interna. Se clasifican en fermiones y bosones de norma; dentro de los fermiones se mencionan los leptones (neutrinos, electrones, muones y tau, y sus antipartículas), los quarks (arriba, abajo, fondo, cima, extraño y encanto); dentro de los bosones de norma se mencionan los fotones (portadores de la fuerza electromagnética), W, Z (portadores de la fuerza electrodébil), gluones (portadores de la interacción fuerte) (Menchaca,



2017)., Higgs (mecanismo de la creación de masa), y los gravitones (hipotéticamente debería ser la portadora de la interacción gravitacional). Los ladrones, por otra parte, están formados por otras partículas, los mesones están formados por un par quark-antiquark (piones, kaones, eta), los bariones están formados por tres quarks diferentes (protón, neutrón, delta, lambda, sigma, xi y omega). La fuerza fuerte es la responsable de mantener a los ladrones en el núcleo atómico, al unirse los electrones se crea un átomo y cuando se unen los átomos se forman los elementos de la tabla periódica. Las partículas y sus interacciones se estudian en la Tierra gracias a experimentos como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), localizado en la frontera entre Suiza y Francia, es una colaboración internacional y en él se hacen chocar partículas aceleradas a energías muy altas para poder estudiar las partículas resultantes después de la colisión (LHC,CERN).

Las astropartículas a su vez, son partículas que provienen del espacio exterior, los rayos gamma no tienen carga ni masa en reposo, los neutrinos no tienen carga y su masa es muy pequeña y no se ha podido determinar con total certeza (KATRIN, KIT). Por su parte, los rayos cósmicos (RC) son núcleos de átomos y partículas cargadas que llegan a la Tierra desde el espacio exterior, todavía no se sabe exactamente su influencia en la vida en el planeta, sin embargo, ésta ha sido posible con su presencia. Se sabe que son responsables de la creación de algunos elementos como el litio o el berilio y el famoso carbono 14, usado para datar restos orgánicos antiguos. Los rayos cósmicos fueron descubiertos cuando en 1912 Víctor Hess, físico austriaco, estudiaba la radiación en la atmósfera, y descubrió que mientras más ascendía en el globo aerostático en el que viajaba, la radiación medida aumentaba, concluyendo que ésta debería provenir del espacio exterior. Desde entonces a esta radiación se le llamó cósmica, o *rayos cósmicos* (Hess, 1912); uno de los investigadores más activos y pioneros en su estudio fue el mexicano Manuel Sandoval Vallarta, cuyos trabajos llevaron a la conclusión de que la naturaleza de los RC era de núcleos atómicos (protones) (Otaola, 2015).

Los RC fueron por varias décadas la única fuente de información sobre las partículas elementales, un ejemplo de ello es el pion, una partícula predicha teóricamente (1935), que se descubrió en mediciones de RC (1947). Posteriormente los aceleradores y colisionadores construidos por los seres humanos, permitieron observar a las partículas en ambientes controlados y a las energías deseadas. No obstante, cuando las energías de interés fueron subiendo cada vez más, se llegó a un límite, pues las dimensiones de los aparatos necesarios para alcanzar energías hasta 10^{17} eV¹ o más eran inviables tecnológicamente y económicamente. A estas energías los RC, son llamados ultra-energéticos (RCUE), y vuelven a ser las únicas fuentes de información disponibles. Los misterios a investigar de los RCUE, incluyen conocer cuáles son y dónde están las fuentes de donde provienen, cómo se aceleran, y cómo se propagan en los entornos magnetizados del universo. La retroalimentación que se puede obtener de ellos y la física fundamental está en los temas de su interacción con la atmósfera y la información de temas más allá del Modelo Estándar de las partículas elementales que se puede obtener de ellos.

El espectro de energía de los RC abarca el rango de 10 eV- 10^{20} eV y expresa el flujo de RC como función de la energía, conforme la energía aumenta, el flujo disminuye y es más difícil poder medirlos. Tiene distintas estructuras que son indicativas del cambio en el origen y mecanismos de aceleración y propagación de los RC, se pueden mencionar la rodilla, la segunda rodilla, el tobillo y el empuje, los nombres obedecen a su similitud con una pierna humana (Masip, 2016), la **Fig. 1** muestra el espectro más reciente reportado por el Particle Data Group (Espectro, PDG).

Cuando los RC llegan a la atmósfera terrestre, interactúan con las moléculas y se forma un chubasco atmosférico extendido (CAE). Los CAE's son lluvias de partículas secundarias que se forman a una altura de entre 8 km y 10 km, tienen tres componentes, la hadrónica, que alimenta al CAE durante todo su desarrollo, la electromagnética que es la más abundante y la muónica, que es la más penetrante. Lo que se observa de los CAE en la Tierra es su desarrollo y las partículas que alcanzan la superficie; una vez detectadas estas partículas secundarias, se reconstruye la energía de la partícula inicial, así como su dirección de llegada y otras observables que pueden servir para estimar su origen y su naturaleza (composición química).

Durante la conferencia se describen las distintas técnicas de medición usadas para detectar los RC, haciendo énfasis en las que se cultivan en el Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías de la Facultad de Ciencias en Física y

¹ Un electronvolt (eV) se define como la energía cinética de un electrón cuando atraviesa una diferencia de potencial de 1 Volt.

Matemáticas de la Benemérita UNACH (LabAstro-UNACH). De igual manera se describe la conexión con los estudios de clima espacial. El clima espacial se define como la medición y el análisis en tiempo real del conjunto de propiedades físicas del Sol, el medio interplanetario, la magnetosfera, la atmósfera y la superficie terrestre que se encuentran influenciadas directa o indirectamente por la actividad solar y las cuales tienen un impacto en la infraestructura, tecnología, sociedad y salud (Clima,sciesmex).

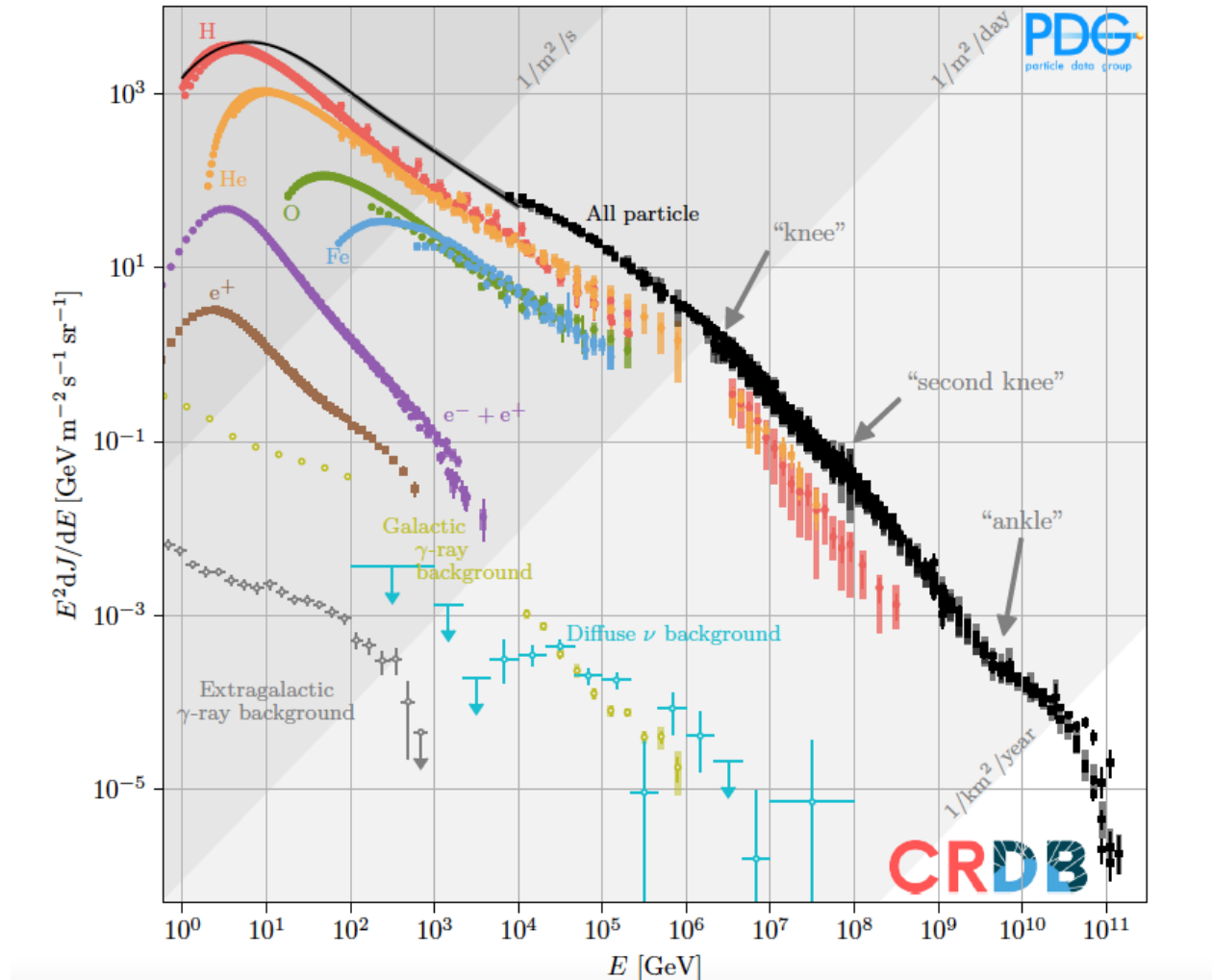
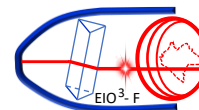


Figura 1. Espectro de energía de los RC, reportado en 2024 por el Particle Data Group (PDG).

2. Métodos.

En el LabAstro-UNACH se cuenta con cuatro instrumentos de medición de RC y clima espacial, el detector Escaramujo que usa la técnica de detección por centelleo, el tanque *Jaguarito*, parte del experimento LAGO, que mide la luz Cherenkov en agua (WCD), una cámara de placas resistivas (RPC) y una antena de radio que es parte de la red mundial e-CALLISTO y del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE). Por otro lado, el LabAstro-UNACH también tiene colaboración con el Observatorio Pierre Auger (Auger), el experimento HAWC y SWGO, además del experimento MATHUSLA; por tal motivo también se mencionan otras técnicas usadas en Auger, tal como la detección de luz de fluorescencia en la atmósfera (FD), plásticos centelladores subterráneos y antenas de radio. También se menciona brevemente el papel de los satélites e instrumentos colocados en estaciones espaciales, que tienen el objetivo de medir RC, ya que el LabAstro-UNACH también contribuyó en un estudio relacionado con uno de estos instrumentos



(COLMENA). Todas las técnicas usadas en el estudio de los RC se conocen como mediciones indirectas, ya que con ellas no se mide exactamente el RC primario, sino los cambios que éste produce en los distintos detectores, o en su paso por la atmósfera. Debido a que los RC perturban los distintos medios usados en los detectores, produciendo en su mayoría luz, el uso de fibras ópticas y detectores de luz tales como los tubos fotomultiplicadores (PMT) o los fotomultiplicadores de silicio (SiPM), se vuelve indispensable. El contar con todos estos instrumentos permitirán eventualmente realizar estudios complementarios con distintas técnicas de medición y con distintas frecuencias.

3. Desarrollo.

Escaramujo (Plástico centellador y SiPM).

El detector Escaramujo fue ideado por el físico Federico Izraelevitz con el apoyo de varios colegas de Fermilab, con el objetivo de proveer a instituciones de educación superior de Latinoamérica, que no contaban con recursos, de un detector profesional de rayos cósmicos. En Chiapas se llevó a cabo un taller para armar el detector y para realizar algunas mediciones estándar con él en el año 2015, el detector quedó en donación en el LabAstro-UNACH (Escaramujo, detector). Consiste en 3 plásticos centelladores (EJ-200) y 3 fotomultiplicadores de silicio (SiPM) tipo MicroFC-600-SMT, SensL. La captura de datos se hace con una tarjeta QuarkNet, a través de la cual se digitalizan las señales, posteriormente los datos se leen con una tarjeta Raspberry PI2; cuenta también con un módulo GPS y sensor de temperatura, así como con un preamplificador para poner los voltajes de 27 V a 36 V. Actualmente también se le agregó un sensor de presión, lo que permitirá obtener datos útiles para la corrección del flujo de RC por presión y temperatura (ver Fig. 2). Cuando una partícula relacionada con RC atraviesa el plástico centellador, produce una luz que es amplificada por el SiPM y después digitalizada para su análisis. Al ser tres plásticos, se pueden medir coincidencias entre ellas. Algunas mediciones que se pueden realizar son la modulación día-noche del flujo de RC (muones atmosféricos), la vida media del muon, y fenómenos relacionados con el clima espacial, ya que mientras el sol esté activo, el flujo de RC disminuye (ver Fig. 3).

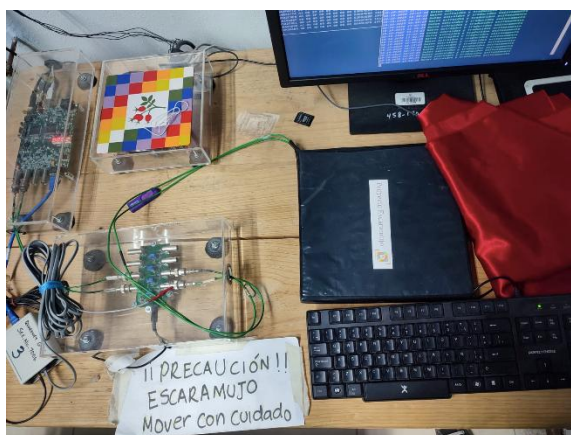


Figura 2. Detector Escaramujo trabajando.

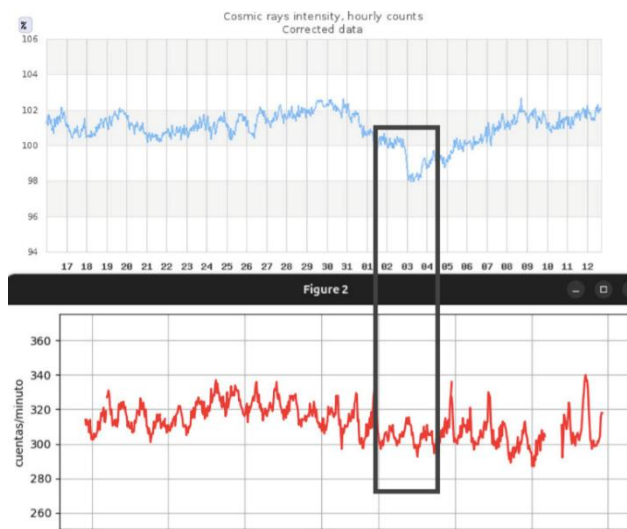
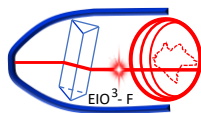


Figura 3. Medición de una disminución del flujo de RC, relacionado con la actividad solar (clima espacial), la gráfica azul muestra los datos medidos con el detector de RC de la UNAM y la roja muestra los datos obtenidos con el detector Escaramujo, se observa también una leve disminución.

LAGO (WCD).

El Observatorio Latinoamericano Gigante, o LAGO por sus siglas en inglés, es un observatorio de astrofísica a escala global, orientado a la investigación básica sobre el universo extremo (por ejemplo, destellos de rayos gamma, GRB), fenómenos de clima espacial y radiación atmosférica a nivel del suelo. LAGO también tiene el objetivo de formar gente en instrumentación sobre RC (LAGO,net). Consiste en una red de detectores de luz Cherenkov en agua (WCD), colocados a lo largo del continente latinoamericano, abarcando así una amplitud muy grande en latitud y longitud. Cuando un RC atraviesa un volumen de agua pura contenido en un WCD, excita al agua y se produce la luz Cherenkov, debido a que el RC se mueve más rápido que la luz en dicho medio. La luz producida se amplifica por un tubo fotomultiplicador (PMT de 8 pulgadas, donado por Auger), posteriormente se digitaliza la señal en una tarjeta desarrollada por la colaboración y se leen los datos, en el caso del sitio de Tuxtla, con una tarjeta Red Pitaya. El detector LAGO de Chiapas se llama *Jaguarito* y posee un circuito complementario generador de voltaje negativo y de alto voltaje, así como la instalación de un ventilador para enfriar los circuitos. Los datos se comparten con la colaboración en un repositorio en Colombia y se almacenan localmente en el Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño (LARCAD-UNACH). Junto con el detector, también se han desarrollado simulaciones del mismo (con Geant4 (Geant4, sim)) y del flujo esperado (con CORSIKA (CORSIKA,sim)), con el objetivo de calibrarlo correctamente y monitorear su funcionamiento. La **Fig. 4** muestra el detector *Jaguarito* con el grupo que ayudó a su instalación y la **Fig. 5** muestra una medición preliminar del flujo de RC junto con la corrección por presión (barométrica). El principio de medición usado en los WCD de LAGO es el mismo que el usado en los experimentos HAWC (HAWC,web), el que se planea usar en SWGO (SWGO,web) y como se verá en la siguiente sección, por Auger (Auger,web).



Figura 4. Grupo de estudiantes e investigadores que participaron en la instalación del detector “Jaguarito”, de LAGO en Tuxtla Gutiérrez.

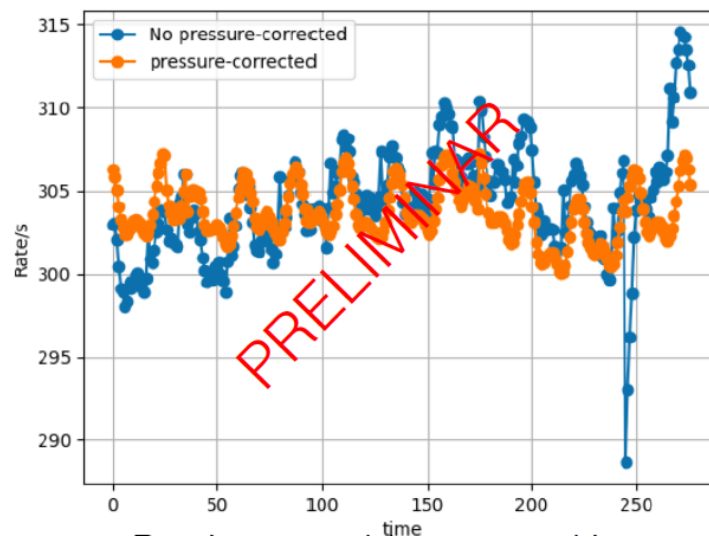
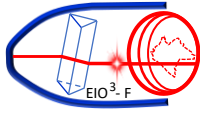


Figura 5. Flujo de RC medido en “Jaguarito” en un periodo de alrededor de 10 días, junto con la corrección del flujo por presión (corrección barométrica).

Observatorio Pierre Auger (Auger).

El Observatorio Pierre Auger es el observatorio de RCUE más grande del mundo. La **Fig. 6** muestra el mapa completo del Observatorio Pierre Auger (Roth,2025), indicando los lugares donde se ubican los distintos tipos de detectores. Una de las componentes es el detector de superficie (SD), formado por estaciones (tanques de 12 t de agua pura o WCD). Las estaciones están distribuidas de acuerdo con su separación (1500 m, 750 m o 433 m), en tres redes de distintos tamaños (3000 km², 24 km² y 2 km²) y número (1660, 61 y 19 estaciones). Los tamaños están directamente relacionados con la energía que son capaces de medir ($>10^{18.5}$ eV, $> 10^{17.5}$ eV y $> 6 \times 10^{16}$ eV respectivamente). Otra técnica usada en el SD es la detección de luz en fibras de plástico centellador, colocadas arriba de cada estación (SSD). El WCD y el SSD se complementan, el primero es más sensible a medir ambas componentes, la muónica y electromagnética, mientras que el segundo es más sensible a la componente electromagnética, el poder distinguirlas



ayuda a identificar la composición química del RC primario. La luz del WCD y del SSD se detecta por medio de tubos fotomultiplicadores (PMT). Además, cada estación tiene un detector de radio (RD) que mide emisión de radio (componente electromagnética) coherente del CAE en el rango de 30-80 MHz, se trata de una antena dipolar conocida como SALLA y se activa cada que el WCD también presenta alguna señal. El RD complementa las mediciones del WCD para ángulos cenitales mayores de 60° . La Fig. 7 muestra estaciones del SD, con el WCD, SSD y RD. Bajo las redes de 750 m y 433 m, se incluye un contador de muones (UMD-AMIGA) que mide en el rango de energía $> 10^{17.5}$ eV. El UMD mide la componente muónica usando 64 bandas de plástico centellador enterrado a una profundidad de 2.3 m y acopladas a matrices de SiPM's. La Figura 3 muestra una imagen del UMD.

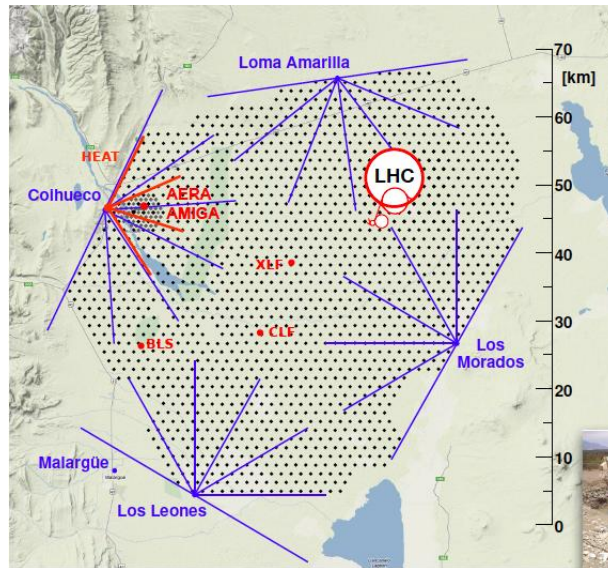
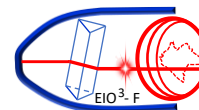


Figura 6. Mapa del Observatorio Pierre Auger. Los puntos negros son las estaciones WCD y las líneas en los lados muestran la dirección en la que observan los telescopios del FD. Se superpone el área del gran colisionador de hadrones (LHC) para comparación.



Figura 7. Estaciones del SD mostrando el WCD, SSD y el RD.

El observatorio también tiene la red de ingeniería de radio de Auger (AERA), que mide en el rango de 30 a 80 MHz, y consta de 153 estaciones abarcando un área de 17 km^2 . Con esta red además de detectar la emisión de radio proveniente de los UHECR, también se puede estudiar el clima espacial (ver Fig. 8.). En los lados del SD se acomodan cuatro edificios que conforman el detector de Fluorescencia (FD). Cada edificio tiene 6 telescopios, que observan el cielo nocturno midiendo las emisiones de fluorescencia producidas por los CAE a su paso por la atmósfera. Los telescopios consisten cada uno en un espejo esférico de $3.6 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$ que tiene 440 PMTs en su foco, y una cámara de $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$, que puede observar CAE's alejados más de 10 km de distancia. El rango de energía que el FD puede



medir es de $> 10^{20} \text{ eV}$. Cerca de uno de los sitios del FD, se encuentran tres telescopios de alta elevación (HEAT), los cuales aumentan el rango de visión hacia regiones más superiores de la atmósfera, permitiendo aumentar el rango de energía de medición. En total el FD tiene en total 27 telescopios funcionando durante las noches, alrededor de un 15% del tiempo (ver Fig. 9). El SD y el FD se complementan de varias maneras, una es en el tiempo en el que se toman las mediciones, ya que a diferencia del FD, el SD funciona 100% del tiempo, lo que hace que se obtengan muchos más datos. Además, el FD mide casi directamente la energía de los CAE's a través de observar las partículas que se producen en el CAE; con esta medición se puede calibrar la energía que se mide en el SD. Mientras que el FD observa el desarrollo del CAE en la atmósfera, el SD detecta la huella que deja en la superficie (ver Fig. 10). En el Observatorio también se pueden estudiar destellos descendentes de rayos gamma terrestres (TGFs), del orden de MeVs de energía, que se producen en las nubes de tormentas, usando la red de 1500 m del SD. Así también, con el FD se pueden estudiar fenómenos transitorios como las emisiones de luz y perturbaciones de baja frecuencia debido a fuentes electromagnéticas de pulsos (ELVES), que ocurren en la base de la ionosfera cuando un relámpago emite un pulso electromagnético fuerte. También se pueden medir perturbaciones estratosféricas o mesosféricas que resultan de la electrificación intensa de tormentas eléctricas (SPRITES), entre otros. Estas mediciones se mejoran con el uso de cámaras sensibles independientes que complementan al FD. Todos estos fenómenos, junto con el clima espacial, se conocen como cosmo-geofísica. Otros complementos que se pueden usar en del observatorio son los rayos láser LIDAR para monitorear el estado de la atmósfera, o globos meteorológicos que recolectan muestras de la atmósfera para mejorar las mediciones del FD. Todas las imágenes se obtuvieron de (Auger,web).



Figura 8. Estación de AERA.



Figura 9. Edificio del telescopio de FD, el recuadro superior se muestra HEAT y en la inferior un telescopio con el espejo y los PMT's.

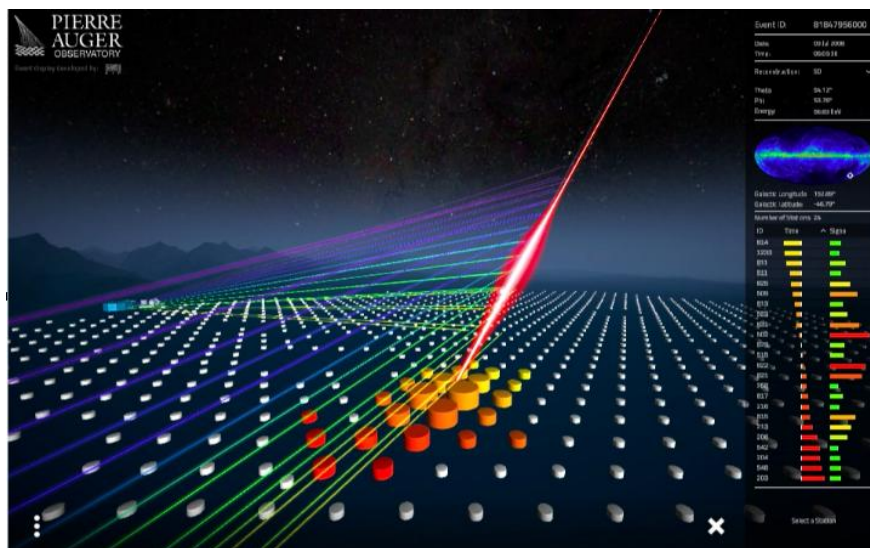


Figura 10. Recreación 3D de un evento híbrido, el CAE es el rayo rojo, las líneas de colores son las observaciones de los detectores de FD y los tanques en el suelo de distintos tamaños y colores son las estaciones del SD con distintas señales.

RPC y MATHUSLA.

Las cámaras de placas resistivas o RPC por sus siglas en inglés son detectores de RC que tienen buena resolución espacial y temporal. Están basados en el uso de un mecanismo de ionización de un gas sometido a una diferencia de potencial, el cual produce una corriente al paso de un RC. El detector que se tiene en el LabAstro-UNACH tiene un área de detección de 400 cm², placas de vidrio de 2 mm de espesor como electrodos, con una pintura resistida de grafito, cubierta con placas de cobre para capturar la corriente, todo cubierto por una caja de aluminio. Usa una mezcla de gases de ~95% de freón, ~3.9 de isobuteno y ~0.60% de hexafluoruro de azufre. Para trabajar necesita una diferencia de potencial de 7 kV a 10 kV. La [Fig. 11](#) muestra un esquema de la estructura de la RPC y la [Fig. 12](#) muestra la parte interna con las componentes usadas (Ordóñez,2020).

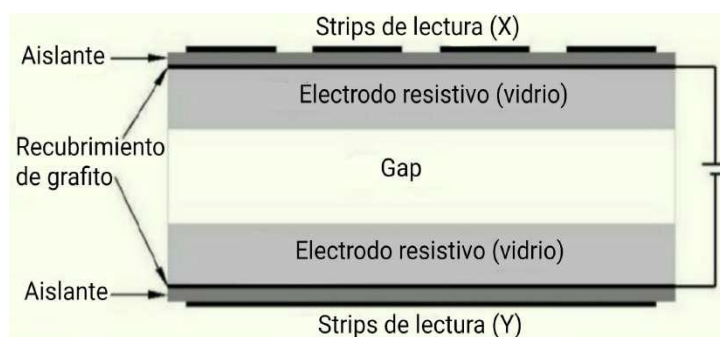


Figura 11. Esquema de la estructura de la RPC que se encuentra en el LabAstro-UNACH.

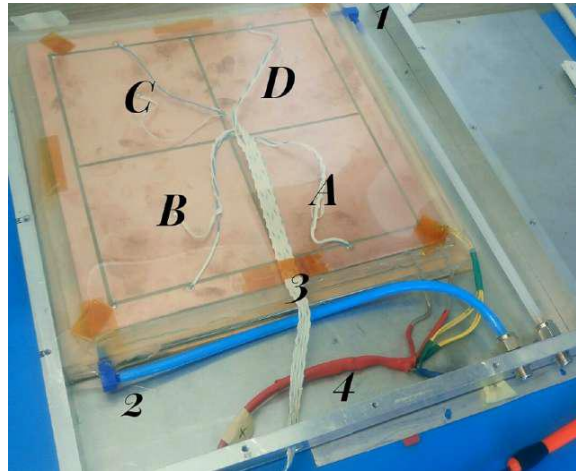
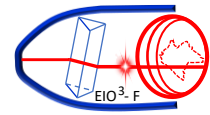


Figura 12. Componentes de la RPC; 1.-Entrada del gas, 2.-Salida del gas, 3.-Cables que guían la corriente inducida hacia el osciloscopio o contador, 4.-Alimentación de la fuente de HV a los electrodos.

Las RPC son usadas también para detectar partículas en otros experimentos tales como los que se encuentran en el LHC, en especial el LabAstro-UNACH está colaborando en la propuesta MATHUSLA, que se pretende colocar arriba del detector CMS y es un detector de partículas que usa plástico centellador. El estudio realizado pretende estimar el potencial de MATHUSLA para medir también RC del orden de PeV's, con el uso de una RPC, este es un trabajo en progreso (Alpigiani, 2023).

Satélites.

Además de las mediciones de RC que se realizan desde la Tierra, es posible detectarlos desde fuera de nuestro planeta, ya sea observando hacia la atmósfera terrestre o captando directamente los RC que pasan cerca de los detectores en el espacio exterior. Estas mediciones son posibles con el uso de detectores acoplados a satélites, así se pueden mencionar el experimento SWIFT (SWIFT,web), que puede estudiar emisiones provenientes de rayos gamma, rayos X y el visible; el telescopio FERMI (FERMI,web), que estudia rayos gamma; PAMELA (PAMELA,web), que estudia RC, antimateria, modulación solar de RC y materia oscura; AMS02 (AMS02,web), que estudia la antimateria, RC y materia oscura; el detector K-EUSO (KEUSO,web), que mide RCUE detectando fluorescencia y luz Cherenkov en la atmósfera terrestre durante las noches. En especial, en el LabAstro-UNACH se ha colaborado en simulaciones con el software SPENVIS (SPENVIS,web), para estimar la radiación cósmica a la que sería sometido un detector cargado en la misión COLMENA (COLMENA,web), esta misión pretende explorar la superficie lunar, la **Fig.13** muestra un prototipo del robot de la misión COLMENA-1.

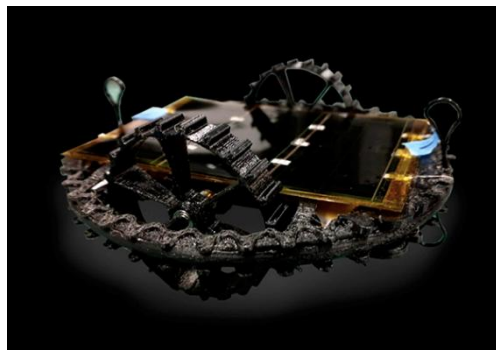
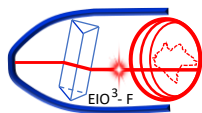


Figura 13. Imagen de uno de los robots usados en la misión COLMENA-1.



CALLISTO.

La antena CALLISTO es parte de la Red Internacional de Radiospectrómetros solares e-CALLISTO (CALLISTO,web), una colaboración que se dedica a estudiar el clima espacial. Se pueden estudiar fenómenos como erupciones solares, o eyecciones de masa coronal, usando las emisiones de radio en el rango de 45 MHz a 230 MHz. En el caso de México, se tiene la Red de Espectrómetros CALLISTO REC-Mx, que está a cargo del Instituto de Geofísica, Unidad Morelia de la UNAM (REC-MX, web) es parte del Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) (LANCE,web). En septiembre de 2024 se instaló una antena en el campus de Ciudad Universitaria de la UNACH, esta antena opera en el rango de 45 MHz a 90 MHz debido a las interferencias en otros rangos. Se trata de una antena tipo Long Wavelength Array (LWA) y es un dipolo que a simple vista parece una sombrilla (ver Fig.14). Desde que se instaló la antena en la UNACH, ha sido de las que más ha detectado eventos a nivel mundial, colocándose siempre en los primeros 5 lugares, así también con ella se cubre la parte sur del territorio mexicano. La Fig. 15 muestra la primera medición observada con la antena de Chiapas, el 22 de septiembre de 2024. Cabe destacar que el Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño de la UNACH (LARCAD) tiene un espejo de los datos de CALLISTO a nivel nacional.



Figura 14. Antena CALLISTO ubicada en el campus de CU de la UNACH, a cargo del LabAstro-UNACH.

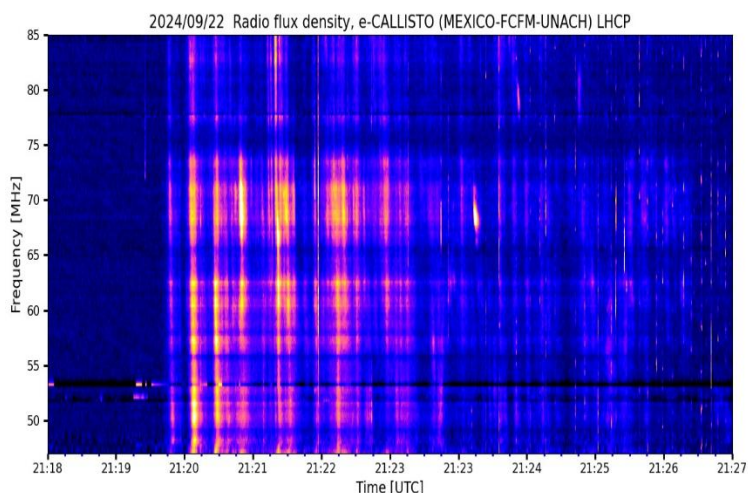
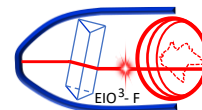


Figura 15. Primer evento medido con la antena CALLISTO de la UNACH, el 22 de septiembre de 2024.



Conclusiones.

El LabAstro-UNACH cuenta con cuatro instrumentos que explotan las técnicas de medición de RC más usadas en los grandes instrumentos que existen en la actualidad en el mundo. Con ello estudiantes de la FCFM pueden familiarizarse con los datos, las técnicas, protocolos y procesos, así como con el análisis correspondiente, adquiriendo una formación que les permitirá involucrarse en cualquier otro instrumento que tenga impacto en el desarrollo científico de esta área de investigación a nivel mundial. De igual forma tendrán la oportunidad de desarrollar nuevos detectores basados en las técnicas mencionadas, o incluso podrán idear nuevas técnicas. Además del conocimiento en RC y la física involucrada, es importante contar con la colaboración de expertos en electrónica y óptica, para caracterizar los instrumentos desarrollados de manera eficiente y correcta.

Créditos.

La autora agradece a la Benemérita UNACH, a PRODEP, a la SECIHTI (CONACYT), a la ADITECH, a L'Oréal, al DAAD, al CERN, LANCE, Fermilab, Federico Izraelevitz y al LARCAD por el financiamiento y apoyo que se ha proporcionado a lo largo de los años para que se concrete y robustezca el Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías de la FCFM, así como a los miembros (profesores y estudiantes) de la LGAC de Astrofísica de Altas Energías de la FCFM por involucrarse en los distintos proyectos y contribuir a los avances que se han alcanzado.

Referencias bibliográficas.

Alpigiani, C et al. (2023), *Cosmic-ray searches with the MATHUSLA detector*, Trabajo en progreso. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.07704>

AMS02,web, <https://ams02.space/detector>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Auger,web, <https://auger.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

CALLISTO,web, <https://e-callisto.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Clima, sciesmex (2025), <https://www.sciesmex.unam.mx/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

COLMENA,web, <https://linx.nucleares.unam.mx/COLMENA-1.html>, consultado el 18 de octubre de 2025.

CORSIKA,sim, <https://www.iap.kit.edu/corsika/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Escaramujo, detector (2015), <http://www.escaramujo.net>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Espectro, PDG, (2024), <https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-cosmic-rays.pdf>, consultado el 18 de octubre de 2025.

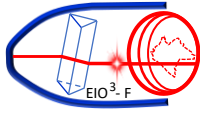
Geant4,sim, <https://geant4.web.cern.ch/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

FERMI,web, <https://fermi.gsfc.nasa.gov/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

HAWC,web, <https://hawc-observatory.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Hess, V. (1912), Z. Phys 13, 1089.

KATRIN,KIT, <https://www.katrin.kit.edu>, consultado el 18 de octubre de 2025.



LAGO, net, <https://lagoproject.net/> , consultado el 18 de octubre de 2025.

LANCE,web, <https://www.lance.unam.mx/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

LHC,CERN, <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>, consultado el 18 de octubre de 2025.

KEUSO,web, <https://www.jemeuso.org/missions/k-euso/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

Masip Mellado, M (2016). *Los rayos cósmicos: las energías más extremas del universo*, RBA, Barcelona, 184 pp, ISBN: 9788447385591.

Menchaca, A. (2017). *El discreto encanto de las partículas elementales*. 4a Edición, México:FCE, SEP, CONACYT, 147 pp, Colección LA CIENCIA PARA TODOS, número 68, ISBN: 9786071652645.

Ordóñez Fernández, MR (2020), *Construcción y caracterización de una cámara de placas resistivas* (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas UNACH, México.

PAMELA,web, <https://pamela-web.web.roma2.infn.it/> , consultado el 18 de octubre de 2025.

REC-MX,web, https://www.rice.unam.mx/?page_id=275, consultado el 18 de octubre de 2025.

Roth, M for the Pierre Auger Collaboration, Exploring the Ultra-High-Energy Universe: Highlights from the Pierre Auger Observatory, ICRC 2025.

SPENVIS,web, <https://www.spenvis.oma.be/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

SWGO,web, <https://www.swgo.org/>, consultado el 18 de octubre de 2025.

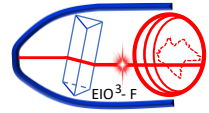
SWIFT,web, <https://swift.gsfc.nasa.gov/> , consultado el 18 de octubre de 2025.

Otaola, J & Valdés Galicia J.F. (2015). *Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. 1a Edición, México:FCE, SEP, CONACYT, 62 pp, Colección LA CIENCIA PARA TODOS, número 108, ISBN: 9681637399.

Biografías de los investigadores.



Karen Salomé Caballero Mora Licenciada en Física por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctora en Ciencias Naturales por el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT), Alemania, hizo una estancia posdoctoral en la Universidad Estatal de Pensilvania (EE.UU.), otra en la Universidad de Santiago de Compostela (España) y otra en el Cinvestav Zacatenco (Ciudad de México). Se ha especializado en astropartículas y clima espacial trabajando en análisis de datos de los experimentos Observatorio Pierre Auger, IceCube, HAWC, LAGO, SWGO, MATHUSLA y CALLISTO. Sus líneas de investigación son el monitoreo del funcionamiento de detectores, estudios de composición, materia oscura, estimación de la energía, y clima espacial, entre otros. En la UNACH ha fomentado el equipamiento del Laboratorio de Astrofísica y Altas Energías, con detectores que usan distintas técnicas de medición. Igualmente estuvo involucrada en la creación del Laboratorio Regional de Cómputo de Alto Desempeño de la UNACH (LARCAD).



Ha tenido varios cargos de gestión en la UNACH como directora de la FCFM y coordinadora general adjunta del MCTP. A nivel nacional ha fungido como Secretaria de la División de Rayos Cósmicos y Presidenta de la División de Partículas y Campos de la Sociedad Mexicana de Física. De manera internacional, actualmente es representante de México ante la Colaboración Pierre Auger, y co-task líder de Educación y Divulgación de la misma Colaboración, así también fue Secretaria de la Colaboración LAGO y es responsable del sitio de Tuxtla de LAGO. Es miembro regular de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) desde 2024 y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel II. En 2014 fue una de las ganadoras de una beca Para la Mujer en la Ciencia de L'Oréal. Organiza varias actividades de divulgación de la ciencia para el público en general y para estudiantes de educación básica y media superior, ha organizado el Día Internacional Cósmico en Chiapas desde 2015, desde 2022 ha sido parte de la organización de la Conferencia para mujeres estudiantes de Física (CUWIP) y es parte de la Red de Mujeres Sembrando ConCiencias, que fomenta el estudio de la ciencia en estudiantes de nivel básico, medio superior y superior y ante el público en general.

Interferometría estelar: principios y demostraciones prácticas.

Stellar interferometry: principles and practical demonstrations.

M.A. Illarramendi* (1).

Departamento de Física Aplicada, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, E-48013 Bilbao, Spain.

ma.illarramendi@ehu.eus.

J. Zubia (2). Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, E-48013 Bilbao, Spain. EHU Quantum Center, University of the Basque Country UPV/EHU, Bilbao 48013, Spain.

joseba.zubia@ehu.eus.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 18, 2025; aceptado en septiembre 30, 2025.

Resumen.

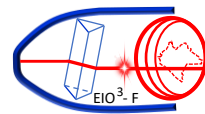
La interferometría espacial constituye una técnica fundamental utilizada en astronomía que permite combinar la luz de múltiples telescopios con el objetivo de alcanzar resoluciones angulares muy superiores a las obtenidas con un único telescopio. La enseñanza de esta disciplina es complicada debido a que se requieren unos conocimientos muy especializados. En el máster en Ciencia y Tecnología Espacial de la Universidad del País Vasco UPV/EHU se han diseñado prácticas de laboratorio basadas en el interferómetro estelar de Michelson utilizando fibras ópticas. Las prácticas, además de proporcionar formación práctica en instrumentación y técnicas ópticas, permiten profundizar conceptos fundamentales de óptica como la coherencia espacial y temporal de la luz.

Palabras claves: Coherencia de la luz, interferometría espacial, instrumentación óptica interferómetro estelar de Michelson.

Abstract.

Space interferometry is a fundamental technique used in astronomy, as it enables the combination of light from multiple telescopes in order to achieve angular resolutions far superior to those obtained with a single instrument. However, teaching this discipline is challenging due to the high degree of specialized knowledge it requires. Within the Master's Program in Space Science and Technology at the University of the Basque Country (UPV/EHU) laboratory exercises have been developed based on Michelson's stellar interferometer, implemented through the use of optical fibers. These exercises not only provide practical training in instrumentation and optical methods but also reinforce fundamental concepts in optics, such as the spatial and temporal coherence of light.

Keywords: Light coherence, Michelson stellar interferometer, optical instrumentation, spatial interferometry,.



1. Descripción de la conferencia.

La interferometría estelar es una técnica empleada en astronomía, en la que la luz detectada por múltiples telescopios se combina para construir un telescopio virtual, cuyo tamaño efectivo equivale a la separación entre telescopios denominada línea base B . Esta técnica permite alcanzar resoluciones muy superiores a la obtenida con un único telescopio. La resolución angular de un telescopio está limitada por el efecto de la difracción ($\approx \lambda/D$), mientras que en un interferómetro estelar depende de la separación entre telescopios ($\approx \lambda/B$) y no del tamaño D del espejo primario. El primer resultado satisfactorio con esta técnica fue obtenido por A.A. Michelson, quien en 1890 diseñó un interferómetro estelar que le permitió medir los diámetros angulares de muchas estrellas brillantes, entre ellas Betelgeuse. Desde entonces, las continuas mejoras en interferometría han permitido determinar el tamaño de numerosos objetos celestes, estudiar muchas superficies estelares e incluso detectar y caracterizar exoplanetas y protoplanetas.

Impartir la asignatura de interferometría estelar no es una tarea sencilla, ya que implica el conocimiento de conceptos complejos relacionados con la óptica, la interferencia de ondas, la astronomía y las técnicas de observación. El estudio en profundidad del funcionamiento de un interferómetro óptico estelar requiere una sólida formación en óptica y astronomía, además de algunos conocimientos técnicos especializados. En este contexto, la realización de prácticas puede ser un recurso muy útil para ayudar a consolidar la comprensión de los conceptos involucrados. En el máster en Ciencia y Tecnología Espacial de la Universidad del País Vasco impartido en la Escuela de Ingeniería de Bilbao (Sánchez-Lavega A, 2014), se han desarrollado prácticas de laboratorio que simulan el funcionamiento del interferómetro estelar de Michelson en las cuales se utilizan fibras ópticas de polímero (POF) para simular estrellas simples o binarias (Illarramendi MA, 2014, Arregui L, 2017, Barata J, 2024). En este trabajo, vamos a mostrar varias prácticas diseñadas para la asignatura “Interferometría Espacial”, donde los estudiantes experimentan el funcionamiento y las capacidades del interferómetro estelar de Michelson. El carácter didáctico de las prácticas hace hincapié en conceptos importantes relacionados con la interferometría estelar, como la coherencia espacial y temporal de la luz, e ilustra los principios del funcionamiento del interferómetro estelar Michelson. Además, el experimento proporciona a los estudiantes formación práctica en el uso de telescopios, cámaras digitales, filtros astronómicos y herramientas de procesamiento de imágenes.

2. Fundamentos teóricos básicos.

Un interferómetro óptico estelar superpone la luz captada por dos o más telescopios con el fin de medir franjas de interferencia. Un modelo básico de este dispositivo se logra utilizando un telescopio cuya apertura se cubre con una tapa que contiene dos agujeros circulares separados por una distancia conocida como línea base B (véase la **Fig. 1**). θ' es el tamaño angular de la fuente y α la posición angular de un punto en el plano de observación o detector. Su principio de funcionamiento es el mismo que el del experimento de la doble rendija de Young. Sin embargo, en este caso, la luz no es la luz monocromática que emite una fuente puntual, sino la luz que emerge de una fuente estelar, es decir, luz policromática emitida por una fuente extensa espacialmente incoherente.

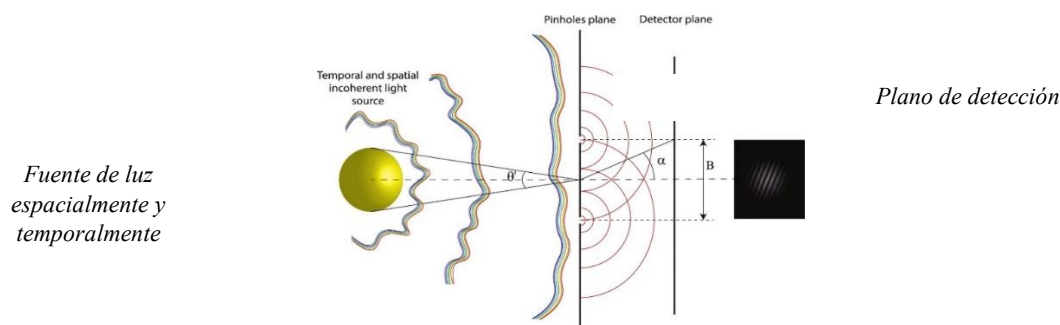
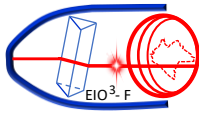


Figura 1. Esquema del interferómetro empleado. Los dos agujeros de diámetro D están separados por una distancia B y situados muy lejos de la fuente. θ' es el tamaño angular. α es el ángulo de observación.



La calidad de las interferencias observadas depende de la coherencia de la luz en los orificios y se caracteriza por la visibilidad o el contraste V de las franjas:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad 0 < V < 1 \quad (1)$$

donde $I_{\max}$ e $I_{\min}$ son las irradiancias máxima y mínima del patrón de interferencia. La visibilidad varía entre valores de 0 y 1. Si $V=0$, la luz es completamente incoherente en los orificios (no hay franjas) y si $V=1$ indica que la luz es completamente coherente (franjas con contraste perfecto). Los valores intermedios entre 0 y 1 corresponden a luz parcialmente coherente. En este interferómetro se deben tener en cuenta tanto la coherencia temporal como la coherencia espacial de la luz. La coherencia temporal está relacionada con la distribución espectral de la luz, mientras que la coherencia espacial está asociada a la geometría espacial de la fuente. Para el caso de fuentes extensas espacialmente incoherentes, el patrón de franjas muestra una reducción significativa de la visibilidad a medida que aumenta el tamaño de la fuente. La reducción de la visibilidad con el tamaño de la fuente se debe a la pérdida de coherencia espacial en los dos agujeros. Suponiendo que la fuente de luz es espacialmente incoherente, cuasi monocromática y muy alejada del interferómetro, la visibilidad viene determinada por el teorema de van Cittert-Zernike. Aplicando este teorema para fuentes de luz circulares y uniformes, que es la forma más simple para describir una estrella, la visibilidad de las franjas viene dada por la siguiente expresión (Illarramendi MA, 2014):

$$V(B) = 2 \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi \theta' B}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \theta' B}{\lambda}} \right| \quad (2)$$

donde J_1 es la función de Bessel de primer orden de primera clase, θ' es el diámetro angular de la estrella y λ es la longitud de onda. Según (2), V disminuye a medida que aumenta el tamaño angular de la fuente, alcanzando el valor nulo cuando $\theta' = 1.22 \lambda/B$.

Si la fuente de luz consiste en dos discos circulares idénticos y uniformes separados por una cierta distancia (formando una estrella binaria) y orientados paralelamente a los dos agujeros, la expresión para la visibilidad puede describirse mediante la fórmula (Arregui L, 2017):

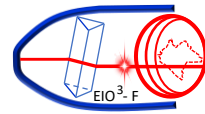
$$V(B) = \frac{2}{\sqrt{2}} \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi \theta' B}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \theta' B}{\lambda}} \right| \sqrt{1 + \cos\left(\frac{2\pi \theta_s B}{\lambda}\right)} \quad (3)$$

donde θ_s es la distancia angular entre los dos discos y θ' es el diámetro angular de cada componente. La expresión (3), indica que, en este caso, V está modulada por la visibilidad de un disco. Esta visibilidad es cero no solo para las mismas condiciones de un disco uniforme, sino también cuando $\theta_s = \frac{\lambda}{2B}(n+1)$, $n = 0, 1, \dots$.

La distribución de la irradiancia o intensidad detectada en el plano de observación del interferómetro (véase la Fig. 1) se puede expresar de la siguiente manera (Barata J, 2024):

$$I(\alpha) = I_0 \left(\frac{J_1\left(\frac{\pi D \alpha}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D \alpha}{\lambda}\right)} \right)^2 \left(1 + V \cos\left(\frac{2\pi B \alpha}{\lambda}\right) \right) \quad (4)$$

En esta ecuación se ha tenido en cuenta la difracción de la luz en los agujeros circulares de diámetro de D . I_0 es una constante y el producto αB representa la diferencia de camino óptico para valores pequeños de α . V es la visibilidad de las franjas, la cual vendría determinada por la ecuación 2 o 3 dependiendo si la estrella fuera simple o binaria, respectivamente.



3. Configuración experimental y procedimiento.

La **Fig. 2** muestra un esquema y una imagen del sistema de fuente de luz diseñado para este trabajo. La luz emitida por un láser (o por un LED) se divide en dos haces mediante un divisor de haz (BS). Estos haces se acoplan a los conectores SMA de dos fibras ópticas de polímero de 2 m de longitud. Por último, los extremos libres de la fibra se insertan en dos orificios situados en un elemento en forma de L (PS). Este dispositivo PS contiene orificios alineados horizontalmente, con diferentes separaciones, de centro a centro (véase la **Fig. 2(c)**). Las POF tienen un diámetro grande (~ 1 mm) y una alta apertura numérica (~ 0.5) y los 2 m de longitud son suficientes para considerar los extremos libres de la fibra, fuentes de luz circulares uniformes y espacialmente incoherentes. El diseño del sistema permite que sus parámetros se puedan cambiar de forma rápida y sencilla. Por ejemplo, el tamaño de la fuente se puede cambiar sin dificultad, simplemente conectando POF de diferentes diámetros.

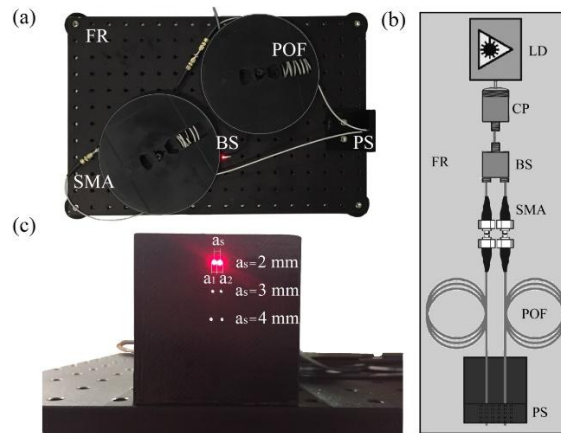


Figura 2. Imagen superior (a) y esquema (b) del sistema de fuente de luz. (c) Imagen frontal del equipo de fuente de luz. LD: diodo láser, CP: acoplador de fibra, BS: divisor de haz, SMA: conector SMA, POF: fibra óptica de polímero, PS: soporte, FR: tabla óptica plano.

La **Fig. 3** muestra el telescopio utilizado para la detección de las imágenes (AstroMaster 114 EQ Newtonian, apertura $D = 114$ mm y distancia focal 1000 mm). Una vez que el telescopio está bien enfocado, su apertura se bloquea con una tapa con dos agujeros idénticos separados a diferentes distancias (**Fig. 3 (a)**). La tapa consta de dos partes: la tapa interna (**Fig. 3 (c)**), que se fija a la apertura del telescopio, y la placa giratoria que contiene los orificios (**Fig. 3 (d)**). Al girar la placa giratoria sobre la tapa interna, se puede variar la distancia entre los orificios, lo que permite obtener franjas de interferencia para diferentes valores de B . Si la fuente de luz utilizada es un LED, se utiliza una rueda de filtros para establecer la longitud de onda y así, asumir luz cuasi-monocromática. Las imágenes del patrón de franjas se adquieren con una cámara situada en el plano focal del telescopio (**Fig. 3 (b)**). Para la detección, se utiliza una cámara comercial DMK41AU02 equipada con el chipset CCD Sony ICX205AL, utilizada por astrónomos aficionados y en nuestro Observatorio Aula Espazio (Sánchez-Lavega A, 2014). Esta cámara tiene una sensibilidad de 0.05 lx y un rango dinámico de 36 dB. El tamaño de los píxeles es de $4.65 \mu\text{m}$, lo que permite obtener imágenes de alta resolución. Los valores de visibilidad de las imágenes adquiridas se calculan mediante un programa implementado en Matlab o con cualquier otro software de análisis de imágenes (por ejemplo, el programa gratuito ImageJ). Para cada imagen detectada, se realiza un corte fotométrico perpendicular al patrón de interferencia. Los valores de visibilidad se calculan mediante la ecuación (1) tomando I_{max} e I_{min} en posiciones de observación cercanas al eje óptico. De esta manera, se minimizan los efectos de la difracción de la luz y de la borrosidad de los máximos de interferencia producido por el ancho espectral de la luz. El valor final de visibilidad es la media de 5 medidas y su error, la desviación estándar.

Los experimentos se han realizado en un pasillo situado en el sótano de la Escuela de Ingeniería de Bilbao en condiciones de poca luz y en el exterior, colocando la fuente en la azotea de un edificio de nuestra Escuela y el telescopio en la última planta de otro edificio. Los experimentos al aire libre se llevaron a cabo en días nublados para disminuir la entrada de luz parásita en el telescopio y así, evitar la disminución del contraste visual y el aumento del

ruido. La distancia entre el sistema de fuente de luz y el telescopio fue de $L = 54 \pm 1$ m para las medidas del sótano y de 75 ± 3 m para las realizadas en el exterior. En ambos casos se necesitaron tiempos de exposición largos para obtener una relación señal-ruido adecuada (de 7 a 10 segundos para las mediciones interiores y hasta 2 minutos para las exteriores).

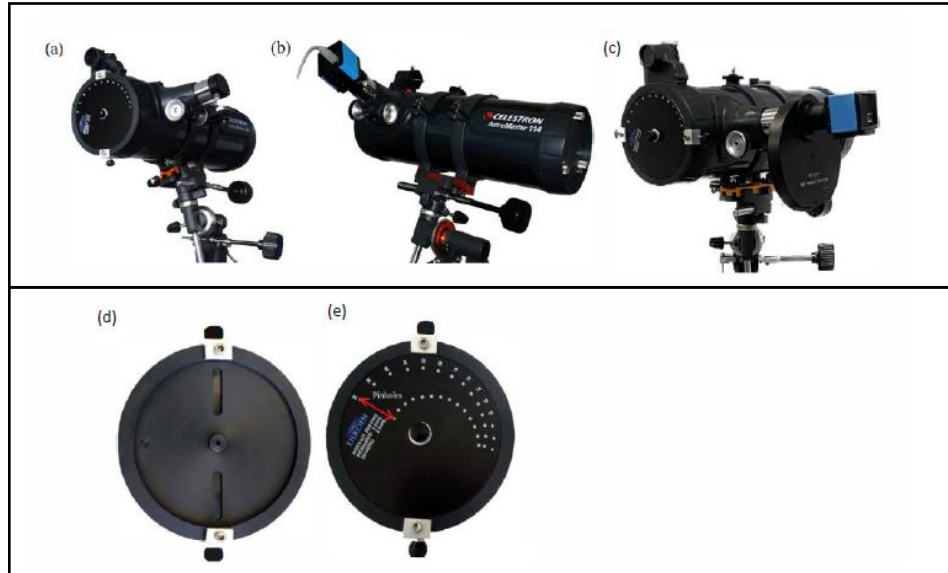


Figura 3. (a) Telescopio con la tapa; (b) Telescopio con la cámara acoplada; (c) Telescopio con la cámara y la rueda de filtros; (d) Rendija interna; (e) Tapas giratorias externas con agujeros circulares. Las distancias de separación entre los agujeros se indican en la máscara; la distancia se modifica girando la tapa giratoria. Los diámetros de los agujeros son de 2 mm y pueden separarse entre 4 y 30 mm. La rueda de filtros de Omegon contiene filtros de 1,25".

La visibilidad de las franjas producidas por una sola fibra en función de la separación entre los orificios obtenida en el sótano puede verse en el gráfico de la izquierda de la **Fig. 4**. Los datos corresponden a tres tamaños angulares diferentes obtenidos utilizando tres fibras de diferente diámetro con una misma $L = 54$ m: 1.88 arcsec, 3.04 arcsec y 4.18 arcsec (valores nominales). Como se puede observar en el gráfico, a medida que aumenta el diámetro de la fibra (o θ') la visibilidad disminuye más rápidamente y el primer mínimo de la visibilidad se desplaza hacia líneas base más pequeñas. Un ajuste de la ecuación (2) a los puntos experimentales da los siguientes resultados: $\theta' = (1.8 \pm 0.1)$ arcsec, $\theta' = (2.8 \pm 0.1)$ arcsec y $\theta' = (3.7 \pm 0.1)$ arcsec para cada fibra, que difieren en un 3 %, un 10 % y un 13 % de sus valores nominales, respectivamente. El gráfico de la derecha de la figura 4 muestra la curva de visibilidad medida al aire libre producida por una fibra. En este caso, el diámetro de la fuente es de 3 mm y $L = 75$ m ($\theta' = 8$ arcsec). Obsérvese que las barras de error de los valores de V medidos al aire libre son mayores que las de los valores medidos en interiores. Ajustando la ecuación (2) a los datos experimentales, obtenemos un tamaño angular para la fuente de $\theta' = 8.3 \pm 0.8$ arcsec. Este tamaño angular difiere aproximadamente en un 3 % del valor real.

Los resultados obtenidos para las curvas de visibilidad en función de B obtenidos utilizando dos fibras, es decir, simulando que la fuente estelar fuera una estrella binaria, muestran que dichas curvas están moduladas por la curva de V producida por una estrella. Los tamaños angulares de las dos estrellas junto con su separación angular estimados de los ajustes a los puntos experimentales utilizando, en este caso la ecuación (3), difieren como mucho en un 6% de los valores nominales correspondientes. A modo de ejemplo, mostramos en la **Fig. 5** los patrones de interferencia y los perfiles de brillo relativo de las imágenes obtenidas para cuatro líneas base diferentes producidas por una estrella binaria. Se puede observar el efecto de difracción de la luz en los agujeros de las tapas y cómo las franjas de interferencia se van acercando entre sí a medida que aumenta B .

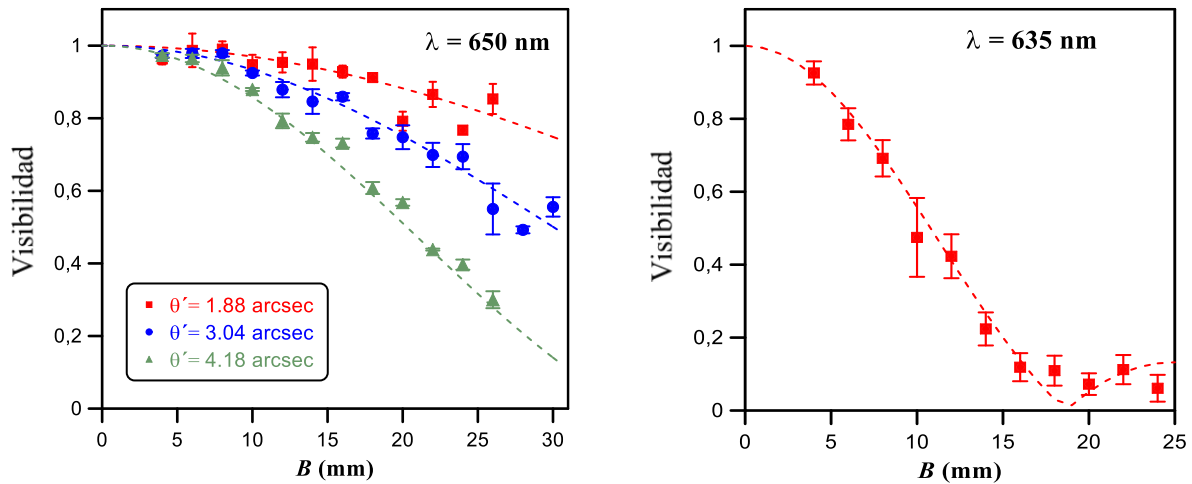
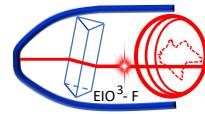


Figura 4. Curvas de visibilidad en función de la separación entre los agujeros. Izquierda: mediciones en interiores. Derecha: mediciones al aire libre. Los símbolos representan las visibilidades determinadas experimentalmente a partir de las imágenes capturadas. Las curvas discontinuas son los ajustes a los datos utilizando la ecuación (2).

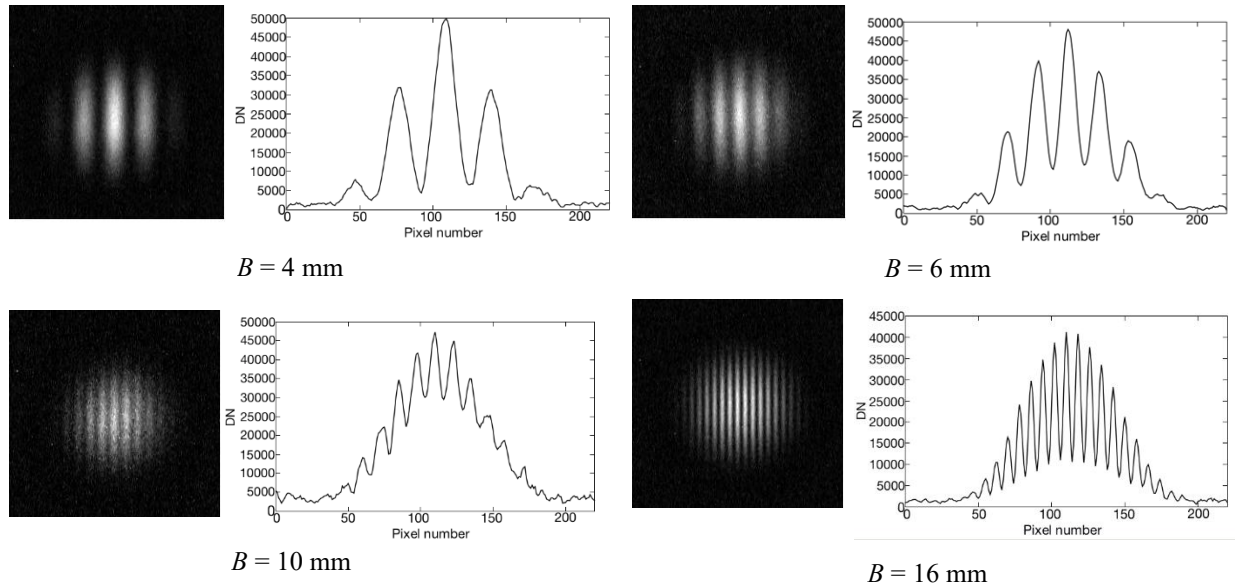
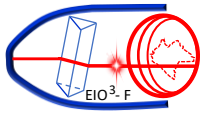


Figura 5. Patrones de interferencia formados por la luz procedente de una fuente circular binaria situada a $L = 54$ m con tres líneas base: $B = 4$ mm, $B = 6$ mm, $B = 10$ mm y $B = 16$ mm. Fuente de luz: dos fibras circulares idénticas de tamaño 1000 mm separadas 2 mm y $\lambda = 650$ nm. A la derecha se muestran los perfiles de brillo relativo de las imágenes para las mismas B .

Finalmente, la **Fig. 6** muestra la variación de la visibilidad en función de la longitud de onda utilizando una estrella simple y otra binaria obtenidas manteniendo las líneas base constantes, $B = 4$ y 14 mm. En estas medidas, las fibras fueron iluminadas con un LED de banda ancha (Thorlabs' MCWHF2 Fibre-Coupled LED) y se insertó la rueda con 9 filtros astronómicos en el ocular del telescopio (véase la figura 3(c)). Como se aprecia, la dependencia de la longitud de onda de V cambia notablemente con la línea base y la geometría de la fuente de luz. Los valores de V apenas varían en el caso de una estrella simple con $B = 4$ mm, mientras que muestran una variación compleja en el caso de una estrella binaria con $B = 14$ mm. Al ajustar (2) a los valores experimentales representados en las **Fig. 6(a)** y **(c)**,



utilizando la línea base correspondiente, estimamos los valores del tamaño angular de la estrella simple. De manera similar, ajustando la ecuación (3) a los valores experimentales mostrados en las Fig. 6(b) y (d) con la línea base correspondiente, estimamos los valores de los tamaños angulares de las dos estrellas junto con su separación angular. Como se puede esperar de las dependencias obtenidas de V frente λ , los valores estimados para el tamaño angular de las estrellas o la separación de la estrella binaria con $B = 14$ mm, concuerdan mejor con los nominales que los obtenidos con $B = 4$ mm (un error del 6% con $B = 14$ mm frente a un error del 30% con $B = 4$ mm).

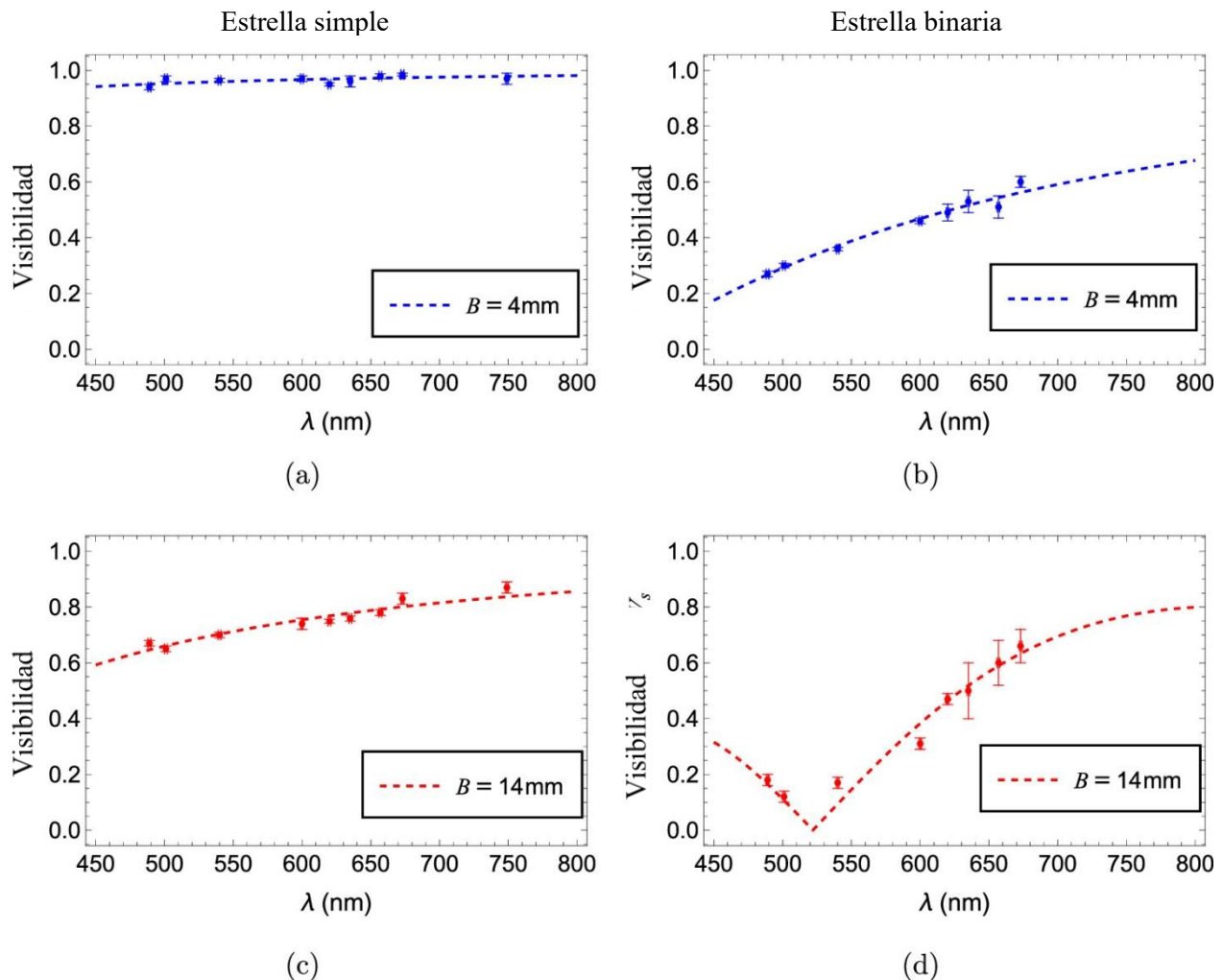
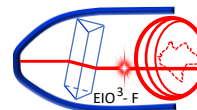


Figura 6. Visibilidad en función de la longitud de onda producida por una estrella única ($\theta' = 3.9$ arcsec) y una estrella binaria ($\theta' = 3.9$ arcsec y $\theta_s' = 11.7$ arcsec). Los símbolos son puntos experimentales, mientras que las líneas discontinuas son el ajuste de la ecuación (2) para una estrella única y de la ecuación (3) para la binaria.

Conclusiones.

En este trabajo se detallan varias prácticas experimentales diseñadas para que los estudiantes profundicen los principios básicos de la interferometría espacial. En particular, se ha diseñado un montaje que simula el funcionamiento del interferómetro estelar de Michelson. El patrón de emisión de fuentes estelares (simples y dobles) se ha reproducido utilizando fibras ópticas de polímero de 2 m de longitud iluminadas por un láser o por un LED, que producen patrones de emisión circulares, uniformes, cuasi-monocromáticos y espacialmente incoherentes. En el caso de que las fibras se



iluminen con un LED se deben utilizar filtros astronómicos para obtener luz cuasi-monocromática. El experimento puede llevarse a cabo tanto en interiores como al aire libre durante el día. Con estos montajes experimentales se han resuelto tamaños angulares de alrededor de 2 arcsec con errores relativos comprendidos mayoritariamente entre 3-15 %. El tamaño más pequeño medido con nuestro interferómetro es comparable al tamaño angular de Urano (3.7 arcsec) o Neptuno (2.2 arcsec).

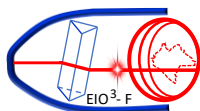
La simplicidad del dispositivo experimental y los buenos resultados obtenidos hacen que estas prácticas sean idóneas para estudiantes de asignaturas de posgrado de astrofísica, astronomía u óptica. Por un lado, proporciona la experiencia práctica necesaria para comprender los conceptos básicos que subyacen en la interferometría espacial, como la coherencia espacial y temporal de la luz. Por otro lado, la práctica proporciona a los estudiantes formación en el uso de telescopios, filtros astronómicos, cámaras digitales y herramientas de procesamiento de imágenes. Para estudiantes principiantes, o para aquellos que abordan este tema de forma residual, el experimento también se puede llevar a cabo evitando los ajustes no lineales y el procesamiento de imágenes. En este caso los estudiantes pueden estimar el tamaño de la fuente estelar simplemente observando la fuente con el ocular del telescopio y calculando el valor más pequeño de la separación entre los agujeros para el cual desaparecen las franjas de interferencia.

Créditos.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos I + D + i/PID2021-122505OBC31, PID2024-155582OB-C31, PID2024-158310NB-I00, PID2021-123131NA-I00 y TED2021-129959B-C2, funded by MCIN/AEI/<https://doi.org/10.13039/501100011033>, by “ERDF A way of making Europe”, by the “European Union Next Generation EU/PRTR”. Este trabajo ha sido también parcialmente financiado por los proyectos No. IT11452-22 del Gobierno Vasco, ELKARTEK 2025 (Smart4S KK-2025/00058 y Newhegaz KK-2025/00074) y por el proyecto Translight de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.

Referencias bibliográficas.

- Arregui L., Illarramendi, M.A., Zubia J., Hueso R., and Sánchez-Lavega A. (2017).**
Interferometry of binary stars using polymer optical fibres. European Journal of Physics, 38, 045704
[10.1088/1361-6404/aa7038](https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa7038)
- Barata J., Illarramendi, M.A., Grandes J., Zubia J. and Arrospide E. (2024)**
Stellar interferometer experiment by measuring visibilities at different wavelengths. European Journal of Physics, 45, 035306
[10.1088/1361-6404/AD3D43](https://doi.org/10.1088/1361-6404/AD3D43)
- Illarramendi, M.A., Hueso R., Zubia J., Aldabaldetrekú, Durana G., and Sánchez-Lavega A. (2014).**
A daylight experiment for teaching stellar interferometry. American Journal of Physics 82, 649-653
<https://doi.org/10.1119/1.4869280>
- Sánchez-Lavega A, Pérez-Hoyos S, Hueso R, del Río-Gaztelurrutia T and Oleaga A (2014)**
The Aula Espazio Gela and the master of space science and technology in the Universidad del País Vasco (University of the Basque Country) Eur. J. Eng. Educ. 39:5 518–26.
<https://doi.org/10.1080/03043797.2013.788611>



Biografías de los investigadores.



M. Asunción Illarramendi es doctora en Física por la Universidad de País Vasco UPV/EHU (premio extraordinario de doctorado 1991), con la tesis titulada “Espectroscopía del ion Cr^{3+} en vidrios fluoruros de metales pesados”. Catedrática del Departamento de Física Aplicada en la Escuela de Ingeniería de Bilbao (EIB), donde imparte asignaturas de Física y Óptica en el grado de Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación y la asignatura Interferometría Espacial en el Máster de Ciencia y Tecnología Espacial. En este ámbito ha estado involucrada en la educación en Óptica y Fotónica, publicando más de diez artículos internacionales docentes JCR y participando en varios congresos internacionales docentes. M.A. Illarramendi investiga en el área de captación, propagación, generación de luz en fibras ópticas de polímero, donde ha publicado más de 75 artículos de investigación JCR.



Prof. Joseba Zubia nació en Barakaldo, España, en 1965. Obtuvo la licenciatura y el doctorado en Física por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Bilbao, España, en 1988 y 1993, respectivamente. Recibió un premio especial de doctorado y el premio de investigación Euskoiker. Desde 2001 es profesor del departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad del País Vasco. Es director del Grupo Applied Photonics, reconocido como excelente por el Sistema Vasco de Ciencia. Sus intereses de investigación incluyen el desarrollo de sensores de fibra óptica, la fabricación de fibras ópticas poliméricas y la óptica cuántica. En estos campos, ha colaborado con investigadores europeos, japoneses y estadounidenses de primer orden, ha publicado más de 150 artículos en revistas SCI-IF y ha contribuido con más de 250 comunicaciones en conferencias internacionales.

La importancia de los sensores de fibra óptica en el monitoreo del deterioro estructural en concreto.

The importance of fiber optic sensors in monitoring structural deterioration in concrete.

Jesús Pérez Toalá* (1).

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

M23270369@tuxtla.tecnm.mx.

Claudia Ivette Ruíz Suárez (2). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,

claudia.rs@tuxtla.tecnm.mx.

Jorge Luis Camas Anzueto (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,

jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Rubén Grajales Coutiño (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,

ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx.

Joel Gómez Pérez (5). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,

joel.gp@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 18, 2025; aceptado en octubre 01, 2025.

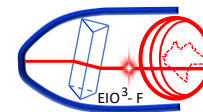
Resumen.

Un puente, edificio, túnel, presa y edificio está diseñado de tal manera que soporte fuerzas verticales y horizontales que ofrezcan estabilidad en dichas construcciones. Estas construcciones consisten de cimentaciones, columnas, vigas, muros y cubiertas. Estas estructuras civiles están construidas principalmente de concreto y varillas, sin embargo, se deterioran en función al tiempo debido a factores físicos, químicos, mecánicos, ambientales y del propio diseño de construcción. Ante esta problemática permanente es necesario establecer sistemas de monitoreo para que se asegure seguridad y mantenimiento preventivo de las estructuras con la finalidad de evitar que alcancen una etapa de posible destrucción. Esto da oportunidad de desarrollar sistemas de monitoreo de la salud estructural, lo cual pueden utilizar sensores ópticos o sensores de fibra óptica. Existen sensores que miden en puntos específicos o a lo largo de toda una superficie, permitiendo registrar con gran detalle deformación, temperatura, y vibraciones de una estructura. Ante la detección temprana de problemas estructurales como microfisuras o deformaciones mínimas, es posible planificar un mejor mantenimiento en las obras de concreto, evitando reparaciones costosas a futuro.

Palabras claves: Deterioro, estructura civil, fibra óptica, monitoreo de la salud estructural, sensores de fibra óptica.

Abstract.

A bridge, building, tunnel, dam, or other structure is designed to withstand both vertical and horizontal forces, thereby providing stability. These structures consist of foundations, columns, beams, walls, and roofs. These civil structures, constructed of concrete and rebar, deteriorate over time due to various factors, including physical, chemical,



mechanical, environmental, and design-related issues. Given this ongoing problem, it is necessary to establish monitoring systems to ensure the safety and preventive maintenance of structures, preventing them from reaching a stage of potential destruction. The problem presents an opportunity to develop structural health monitoring systems that utilize optical or fiber-optic sensors. Sensors measure at specific points or across an entire surface, allowing for detailed recording of a structure's deformation, temperature, and vibrations. Early detection of structural problems, such as microcracks or minimal deformations, enables the planning of more effective maintenance for concrete structures, thereby avoiding costly future repairs.

Keywords: Civil structure, deterioration, fiber optic sensor, optical fiber, structural health monitoring.

1. Antecedentes.

Chiapas ha sido declarado una zona sísmica, tal es el caso que el Servicio Sismológico Nacional detectó 2,992 sismos entre 1.1 y 6.1 en enero de 2025. En Chiapas y en México es importante contar con una cultura de monitoreo de la salud estructural, debido a que predomina la humedad, lluvias intensas y cambios de temperatura constante provocando el deterioro en procesos de corrosión y degradación en infraestructuras de concreto y acero.

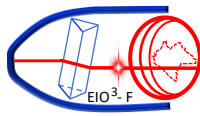
El monitoreo del deterioro estructural en materiales de construcción, especialmente en el concreto, constituye uno de los principales desafíos de la ingeniería civil. Las infraestructuras como puentes, túneles, edificios y presas están sujetas a cargas dinámicas, condiciones ambientales agresivas y procesos de envejecimiento que pueden comprometer su integridad estructural. En este contexto, la detección temprana del daño y la implementación de sistemas de monitoreo continuo son esenciales para garantizar la seguridad y durabilidad de las construcciones (Barrias et al., 2018).

En tiempos pasados, los métodos convencionales de inspección se basaron en técnicas visuales o el uso de sensores eléctricos, como galgas extensométricas y transductores de desplazamiento (Fernández et al., 2019). Sin embargo, estos sistemas presentan limitaciones significativas: baja durabilidad en ambientes agresivos, necesidad de mantenimiento frecuente, y mediciones localizadas que no reflejan el comportamiento total de la estructura (Berrocal et al., 2021).

La introducción de los sensores de fibra óptica (SFO) ha marcado un cambio en el monitoreo de la salud estructural (MSE). Estos sensores, que aprovechan la propagación de la luz dentro de fibras ópticas, permiten la medición precisa y continua de parámetros físicos como deformación, temperatura, vibración y corrosión (Monsberger & Lienhart, 2021). Su alta sensibilidad, inmunidad electromagnética y resistencia a la corrosión los convierten en una herramienta ideal para el SHM de materiales de construcción como el concreto (Zhang et al., 2024).

En los últimos años, los FOS han integrarse exitosamente en proyectos de infraestructura. En túneles y puentes, por ejemplo, los sistemas distribuidos de fibra óptica (DOFS) han permitido obtener mapas completos de deformación en tiempo real, mientras que las rejillas de Bragg en fibra (FBG) se han empleado para medir microdeformaciones en puntos críticos. Gracias a estos avances, el SHM basado en fibra óptica se ha posicionado como una tecnología esencial para el mantenimiento predictivo y la ingeniería sostenible del siglo XXI (Richter et al., 2024).

En este artículo se da a conocer la importancia de los sensores de fibra óptica en el monitoreo de la salud estructural. Esto permitirá que en México se establezcan normas de monitoreo necesarias en cada una de las múltiples construcciones importantes, desde carreteras, puentes, presas, edificios, ferroviario etc. Se detalla que tipo de sensores de fibra óptica pueden ser incorporados y obtener conocimiento científico de frontera para desarrollar sistemas de monitoreo confiables permitiendo que las estructuras civiles sean seguras a través de las futuras generaciones. Esto va permitir que garanticen la seguridad estructural en infraestructura pública. Al generar herramientas de monitoreo no invasivo, el proyecto promueve la prevención de desastres y la seguridad de la población, contribuyendo al bienestar social y a la construcción de ciudades más resilientes y sostenibles.



2. Deterioro en una estructura civil.

El deterioro de las estructuras civiles de concreto ocurre por una combinación de procesos físicos, químicos, mecánicos y ambientales que degradan sus propiedades con el tiempo. En la **Tabla 1** se presenta de forma resumida los tipos de deterioros que puede sufrir una estructura civil si en dado caso no cuenta con un sistema de monitoreo y de prevención. Cada uno de estos tipos de deterioros son importantes de entender el comportamiento de forma individual, ya que permite conocer la forma en que se debe de monitorear. Los mecanismos físicos del deterioro se encuentran relacionados con cambios de temperatura, humedad o esfuerzo mecánico. Los mecanismos químicos se deben a reacciones químicas entre los componentes del concreto o con el entorno. Los mecanismos mecánicos están relacionados con la carga, vibración o fatiga estructural. Las causas ambientales se deben a la presencia de humedad, ambientes marinos, ambientes industriales y radiación solar. Finalmente, los mecanismos provocados por diseño de construcción son: mala proporción agua/cemento (alta porosidad), curado inadecuado (baja densidad superficial), compactación deficiente y falta de mantenimiento preventivo. En la **Fig. 1** se muestra algunos ejemplos de cómo se observa el deterioro del concreto internamente.

Tabla 1. Mecanismos que causan deterioro en una estructura civil.

Tipo de deterioro	Mecanismo principal	Consecuencia
Físico	Congelamiento, erosión, variación térmica	Fisuras y desgaste superficial
Químico	Carbonatación, cloruros, sulfatos, ASR	Corrosión y expansión interna
Mecánico	Sobrecarga, impacto, fatiga	Grietas estructurales
Ambiental	Humedad, sales, contaminantes	Aceleración del daño
Constructivo	Defectos en mezcla o curado	Mayor porosidad y permeabilidad

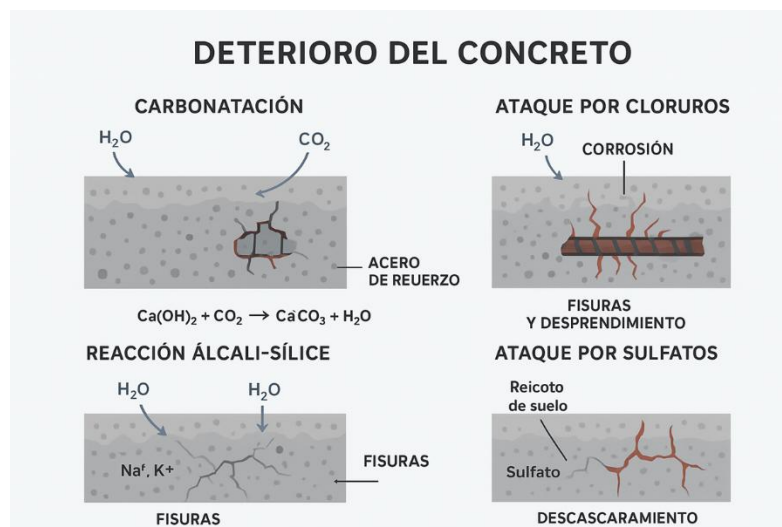
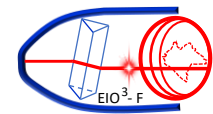


Figura 1. Diferentes mecanismos que se encuentran involucrados en el deterioro del concreto.



3. Monitoreo de la salud estructural.

El MSE se ha convertido en un elemento fundamental dentro de la ingeniería civil actual, ya que el deterioro de una estructura es progresivo, así garantizar la seguridad, durabilidad y confiabilidad operativa. Por lo que es importante desarrollar MSE's para evitar fallos y colapsos estructurales, particularmente en puentes y edificaciones de gran importantes, donde los daños acumulados representan un riesgo para la población y generan elevados costos de reparación o sustitución.

Actualmente, no existen sistemas de seguridad estructural completamente preventivos y se evalúan únicamente cuando los deterioros son visibles o severos, comprometiendo la integridad estructural, tal es el que la evaluación de la estructura civil es llevada a cabo en condiciones críticas o al borde del colapso.

El monitoreo de la salud estructural viene a establecer un mecanismo de medición en tiempo real, continuo o periódico, que involucren parámetros estructurales y ambientales bajo condiciones reales de operación. El objetivo principal del MSE es detectar de manera temprana anomalías o estados críticos, contribuyendo a la prevención de fallos, la reducción de riesgos y la optimización de las estrategias de mantenimiento y rehabilitación. Esta definición complementa la propuesta de Hong et al. (2004) y enfatiza la importancia de la capacidad de alerta temprana en la gestión de infraestructuras.

Un sistema de monitoreo de la salud estructural se conforma de:

1. Sensores, encargado de registrar variables estructurales (tensión, deformación, desplazamiento, vibración y aceleración) y ambientales (temperatura, humedad, velocidad del viento, calidad del suelo o cimentación).
2. Procesamiento de datos, responsable de la adquisición, transmisión, almacenamiento y análisis de la información obtenida.
3. Evaluación de la salud estructural, que integra algoritmos de diagnóstico, modelos predictivos y herramientas de gestión para determinar el estado actual de la estructura y apoyar la toma de decisiones técnicas.

Uno de los principales avances que se ha llevado a cabo en este tipo de sistemas es la incrustación de SFO. Estos SFO's ofrecen alta sensibilidad, estabilidad ante interferencias electromagnéticas, resistencia a condiciones extremas y capacidad de medición distribuida, lo que los convierte en una herramienta estratégica para la detección temprana del deterioro, la prevención de fallos y la gestión eficiente de la infraestructura civil. En la **Fig. 2** se muestra un esquema del procedimiento necesario en el monitoreo de la salud estructural.

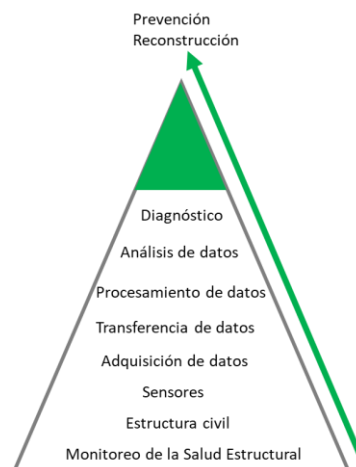
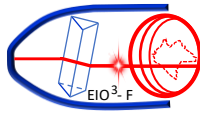


Figura 2. Procedimiento para llevar a cabo un sistema de monitoreo de la salud estructural.



4. Sensores de fibra óptica.

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo que utiliza fibra óptica como medio de transmisión, luz que puede cambiar sus características como función de una variable ya sea física, química o biológica en diferentes medios a través de un transductor, y un fotodetector.

Los sensores de fibra óptica pueden detectar variaciones en diferentes parámetros de la luz, tales como:

- a) Intensidad: Cambios en la potencia óptica transmitida o reflejada, proporcionales al estímulo externo.
- b) Fase: Modificaciones en la diferencia de fase entre dos haces de luz, comúnmente aprovechadas en interferometría.
- c) Longitud de onda: Desplazamientos en el espectro de emisión o reflexión (por ejemplo, en redes de Bragg).
- d) Polarización: Alteraciones en el estado de polarización debido a esfuerzos mecánicos o campos externos.
- e) Tiempo de viaje o frecuencia: Variaciones en el tiempo de propagación o frecuencia de modulación de la señal óptica.

Estos parámetros son característicos de la luz y pueden correlacionarse con parámetros como temperatura, deformación, presión, vibración, aceleración, desplazamiento, pH, concentración iónica o presencia de gases en estructuras civiles.

Los sensores de fibra óptica se clasifican acorde a su principio de operación o configuración estructural:

1. Principio de detección:

Sensor extrínseco: La fibra actúa solo como medio de transmisión llevando la luz a una muestra y la detección ocurre fuera de la fibra.

Sensor intrínseco: La detección ocurre dentro de la propia fibra, aprovechando la interacción directa entre el campo óptico y el estímulo físico, químico o biológico. En la **Fig. 3** se presenta las configuraciones de un sensor de fibra óptica extrínseco e intrínseco.

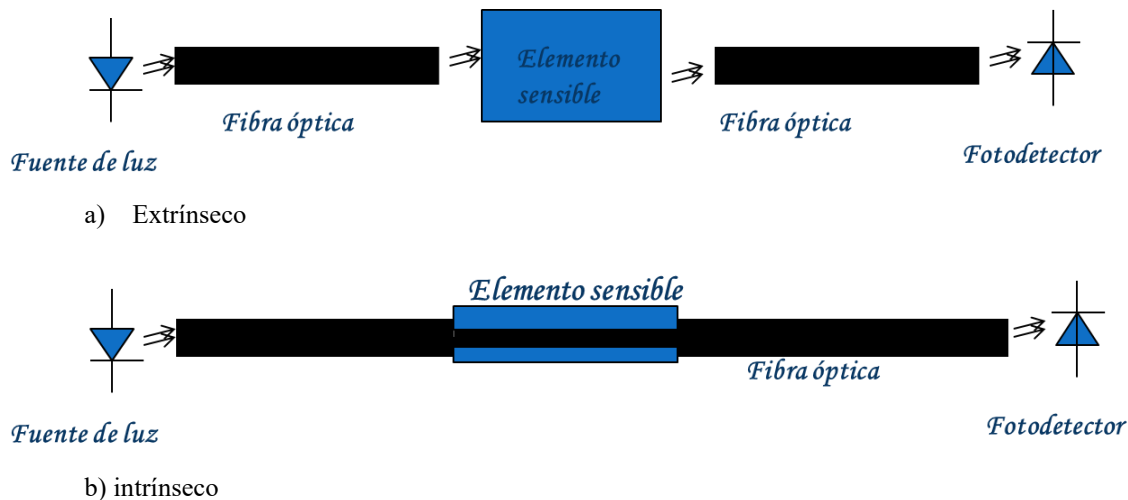


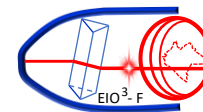
Figura 3. Configuraciones de un sensor de fibra óptica.

2. Principio de medición óptica:

Intensidad: en este caso se mide la variación de la intensidad como una función de un parámetro físico, químico o biológico.

Interferométrico: Detecta variaciones de fase mediante interferometría (Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot).

Cambio de longitud de onda: Utilizan desplazamientos espectrales ya sea de un dispositivo que modifica su longitud de onda de reflexión como la Red de Bragg, o modificación espectral de un fenómeno óptico como la fluorescencia, quimioluminiscencia, entre otros.



Polarización o dispersión: Emplean efectos ópticos específicos (Rayleigh, Raman, Brillouin) para obtener información distribuida a lo largo de la fibra.

3. Cobertura espacial:

Puntuales: Miden únicamente de forma puntual en específicas zonas de interés.

Distribuidos: Proveen información continua a lo largo de toda la longitud de la fibra (varios kilómetros).

Cuasi-distribuidos: Integran múltiples puntos de medición discretos.

4.1. Principio de funcionamiento.

Con la información anterior mencionada, se describe el principio de funcionamiento de un sensor de fibra óptica. El sensor de fibra óptica funciona a través de la emisión de luz que puede ser proveniente desde un LED o láser que se propaga por el núcleo de la fibra óptica. Cuando la luz llega al medio de transducción que puede ser un material externo o un sistema que modifica alguna propiedad física, realiza una modificación física o química en la fibra óptica (deformación, temperatura o índice de refracción). Esta modificación provoca un cambio en la propiedad de la luz (intensidad, fase, longitud de onda, polarización). Esta modificación del parámetro específico de la luz es detectada y analizada a través de un procesamiento optoelectrónico convirtiendo a la señal de luz en una magnitud medible.

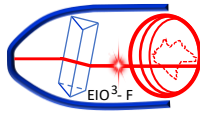
En el caso del monitoreo del deterioro estructural del concreto, los sensores de fibra óptica destacan por su alta sensibilidad, durabilidad y capacidad de funcionamiento en ambientes agresivos. Pueden integrarse directamente en el material durante el colado o adherirse a la superficie para medir deformaciones, fisuras, vibraciones, temperatura, humedad o corrosión sin afectar la integridad estructural. Además, su inmunidad a interferencias electromagnéticas y su tamaño reducido los hace ideales para sistemas de monitoreo continuo en tiempo real en puentes, túneles y edificaciones críticas.

Conclusiones.

Como conclusión en la importancia que tienen los sensores de fibra óptica en el monitoreo del deterioro en concreto se tiene que es necesario debido a sus fortalezas como adaptabilidad a condiciones ambientales extremas, inmunidad a interferencias electromagnéticas importante en el monitoreo continuo y en tiempo real de obras civiles, tanto en zonas urbanas como rurales. La implementación de esta tecnología fortalece las estrategias de mantenimiento preventivo, reduce costos de reparación y promueve la seguridad pública. Esto da oportunidad de desarrollar sistemas con avance tecnológico fundamental para garantizar la seguridad, durabilidad y sostenibilidad de las infraestructuras. Los sensores de fibra óptica permiten versatilidad en función al tipo de infraestructura para la cual se está desarrollando de tal manera que pueden detectar fenómenos críticos como la corrosión del acero de refuerzo, fisuras, deformaciones o variaciones térmicas, evitando fallas estructurales visibles. En el contexto nacional, el desarrollo e integración de sistemas de fibra óptica aplicados al concreto contribuye a la autonomía tecnológica, al fomento de la investigación interdisciplinaria en fotónica e ingeniería estructural, y al fortalecimiento de capacidades científicas orientadas a la preservación de la infraestructura estratégica del país. Además, la investigación y desarrollo de sensores de fibra óptica hacen posible la integración de áreas importantes en fotónica aplicada, ciencia de materiales e ingeniería estructural, lo que impacta en la cooperación interdisciplinaria entre universidades e institutos de investigación y así crear las bases para preparar recurso humano de calidad expertos en sistemas avanzados de monitoreo estructural a través de estudiantes de Maestría y Doctorado, contribuyendo así al desarrollo tecnológico de México.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el parcial financiamiento del proyecto con número de referencia 22925.25-P y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación con el proyecto con clave CBF-2025-I-2863 y por otorgar beca a estudiante de doctorado.



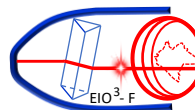
Referencias bibliográficas.

- Barrias, A., Casas, J. R., & Villalba, S. (2018).** *Embedded distributed optical fiber sensors in reinforced concrete structures—A case study.* Sensors, 18(4), 980.
- Berrocal, C. G., Fernández, I., Bado, M. F., Casas, J. R., & Rempling, R. (2021).** *Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing.* Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11, 989–1004.
- Chen, J., & Xu, C. (2021).** *Durability of fiber optic sensors embedded in concrete under alkaline and wet–dry conditions.* Cement and Concrete Composites, 123, 104214.
- Fernández, I., Barrias, A., & Casas, J. R. (2019).** *Application of distributed optical fiber sensors for the monitoring of reinforced concrete beams.* Sensors, 19(20), 4508.
- Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li, Gang-Bing Song, (2004).** *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering,* Engineering Structures, 26(11), 1647-1657.
- Monsberger, C. M., & Lienhart, W. (2021).** *Distributed fiber optic shape sensing of concrete structures.* Sensors, 21(18), 6098.
- Richter, J., Herbers M, Marx S. (2024).** *Crack monitoring on concrete structures with distributed fiber optic sensors—Toward automated data evaluation and assessment.* Structural Concrete. 2024; 25(2): 1465–1480.
- Zhang, X., Zhu, H.-H., Jiang, X., Broere, W., & Long, L. (2024).** *Designing a distributed sensing network for structural health monitoring of concrete tunnels: A case study.* Structural Control and Health Monitoring, 1–15.
- Zhao, Y., Li, X., & Cheng, J. (2021).** *A strain transfer model for detection of pitting corrosion in steel rebars using distributed fiber optic sensors.* Sensors, 21(2), 389.

Biografías de los investigadores.



Jesús Pérez Toalá, obtuvo la Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica por la Universidad Politécnica de Chiapas y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez. Sus investigaciones se enfocan en el desarrollo y aplicación de sensores de fibra óptica para diversas áreas de monitoreo y medición. Actualmente, cursa el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



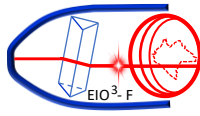
Claudia Ivette Ruíz Suárez, Es Ingeniero Químico con especialidad en Ambiental por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo una Maestría en Ciencias de la Educación por el Instituto de Estudios Universitarios y el Doctorado en Educación por la Universidad del Sur. Además de un Posdoctorado en Desarrollo Humano por Centro Internacional de Estudios Avanzados. Cursó un Diplomado para la Formación y Desarrollo en Competencias Docentes de la Universidad Pedagógica Nacional en Coordinación Sectorial de Desarrollo Académico (COSDAC). Ha impartido cursos y conferencias en el nivel Medio Superior, de acuerdo a su área.



Jorge Luis Camas Anzueto, es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte de la SECIHTI. Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG. Ha publicado más de 60 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 12 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 150 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX



Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez, Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó dos estancias Postdoctorales en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I. Sus investigaciones están dirigidas a la optoelectrónica, a los sensores de fibra óptica, al desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados ajustables a múltiples longitudes de onda. Actualmente, es profesor-investigador en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



Joel Gómez Pérez es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2005 y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2013. Ha colaborado con la Universidad Politécnica de Chiapas en el área de Ingeniería en Mecatrónica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010 y colaborador de la Universidad del Valle de México desde 2013. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores desde 2011.

Plasma frío como herramienta emergente: aplicaciones en alimentos.

Cold plasma as an emerging tool: applications in food.

Mariela Rodríguez* (1).

Department of Food & Human Nutritional Sciences, The University of Manitoba. Richardson Centre for Functional Foods & Nutraceuticals. 196, Innovation Drive, Winnipeg, MB, Canada.

mariela.rodriguez@umanitoba.ca.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 02, 2025; aceptado en octubre 08, 2025.

Resumen.

El plasma frío es una tecnología no térmica emergente que está ganando atención en múltiples campos, especialmente en el procesamiento de alimentos, por su capacidad para mejorar la seguridad y la calidad mientras preserva las propiedades sensoriales. Esta tecnología permite la inactivación microbiana, la degradación de plaguicidas y micotoxinas, y la inactivación enzimática para prevenir cambios indeseables como el pardeamiento y la pérdida de nutrientes. Además, modifica la estructura de las proteínas para reducir la alergenicidad y mejorar la digestibilidad. La eficacia del plasma frío depende de parámetros operativos como el voltaje, el tiempo de exposición y la composición del gas. Como alternativa sostenible, extiende la vida útil, reduce contaminantes y responde a la demanda del consumidor de alimentos seguros y mínimamente procesados.

Palabras clave: Aplicaciones en procesamiento de alimentos, chorro de plasma, descarga de barrera dieléctrica, plasma frío.

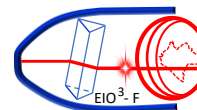
Abstract.

Cold plasma is an emerging non-thermal technology gaining attention across multiple fields, particularly in food processing, for its ability to enhance safety and quality while preserving sensory attributes. This technology enables microbial inactivation, degradation of pesticides and mycotoxins, and enzyme inactivation to prevent undesirable changes such as browning and nutrient loss. It also modifies protein structures to reduce allergenicity and improve digestibility. The effectiveness of cold plasma depends on operational parameters such as voltage, exposure time, and gas composition. As a sustainable alternative, it extends shelf life, reduces contaminants, and meets consumer demand for safe, minimally processed foods.

Keywords: Cold plasma, dielectric barrier discharge, food processing applications, plasma jet.

1. Descripción de la conferencia.

La tecnología de limpieza por plasma se ha consolidado como un enfoque revolucionario en el tratamiento de superficies, al ofrecer una alternativa sin contacto, no destructiva y respetuosa con el medio ambiente frente a los métodos tradicionales. (Pankaj et al., 2018) En esta conferencia se abordarán los fundamentos de la generación de plasma frío, así como una selección de formatos de excitación utilizados en esta tecnología. Se presentará una revisión



integral de los mecanismos, factores que influyen y aplicaciones de las tecnologías de limpieza y modificación de superficies por plasma. Posteriormente, se explorarán algunas de las múltiples aplicaciones de esta tecnología en sectores como la medicina en agricultura, la industria textil, la conservación del patrimonio cultural y la electrónica, donde se utiliza para limpiar componentes delicados, tratar superficies metálicas y mantener dispositivos ópticos y semiconductores.(Nwabor et al., 2022; Sun et al., 2025)

Finalmente, se hará foco en su creciente uso en la industria alimentaria, donde el plasma frío se presenta como una alternativa innovadora a los métodos térmicos convencionales como la pasteurización, esterilización, UHT, horneado, fritura, secado y evaporación que, si bien eficaces, pueden provocar pérdida de nutrientes, alteraciones en el sabor y color, y daños en la textura. (Knorr & Augustin, 2021) Ante estas limitaciones, los consumidores demandan alimentos con características más frescas, lo que ha impulsado la adopción de tecnologías verdes como el plasma frío para mejorar la seguridad alimentaria y extender la vida útil de los productos.(Cherif et al., 2023)

2.1. A qué llamamos Plasma.

El plasma representa el cuarto estado de la materia, distinto de los estados convencionales sólido, líquido y gaseoso. Recordemos que los sólidos, con sus partículas compactas dispuestas en un patrón geométrico fijo, mantienen una forma y un volumen definidos. Los líquidos, aunque también están compuestos por partículas compactas, presentan fluidez, lo que les permite adaptarse a la forma de su recipiente y conservar un volumen definido. Por otro lado, los gases poseen partículas más dispersas que se mueven libremente, lo que les confiere una forma y un volumen indefinidos, ya que se expanden hasta llenar todo el recipiente.(Chang & College, 2002) En cambio, el plasma surge cuando las moléculas o átomos gaseosos pierden electrones, lo que da lugar a una mezcla que engloba iones positivos, electrones libres y partículas neutras, todos los cuales mantienen colectivamente la neutralidad eléctrica. Los procesos de interconversión entre los cuatro estados de la materia se representan en la **Fig. 1**. El grado de ionización puede variar desde el 100 % (gases totalmente ionizados) hasta valores muy bajos (p. ej., 10^{-4} – 10^{-6} ; gases parcialmente ionizados).(Bogaerts et al., 2002) La ionización transforma un gas en plasma, mientras que la desionización permite que el plasma vuelva a convertirse en moléculas gaseosas. El plasma alcanza temperaturas de miles a millones de grados, lo que refleja su alta energía cinética y velocidad. Está presente en laboratorios, aplicaciones cotidianas y el cosmos, como el Sol, cuya temperatura central es de 15 millones de grados Celsius. La fusión nuclear mantiene su estado, y también se manifiesta en la atmósfera terrestre y en lámparas fluorescentes y de neón. La generación de plasma se puede lograr mediante diversos métodos, entre los que se incluyen la ionización por descarga, la ionización térmica, la fotoionización y la ionización por radiación. (Sun et al., 2025).

En el estado de plasma, las moléculas se disocian en sus elementos atómicos, perdiendo electrones y adquiriendo un estado de energía más alto. La eficacia de la tecnología de plasma depende de factores como la energía, definida por la presión, la temperatura, el equilibrio termodinámico entre las partículas, y el tipo de gas utilizado. Aunque la inducción de plasma requiere una energía suficientemente alta, los avances recientes en física de plasma han permitido generar “plasma frío” a temperaturas ambiente y presiones atmosféricas.(Nwabor et al., 2022)

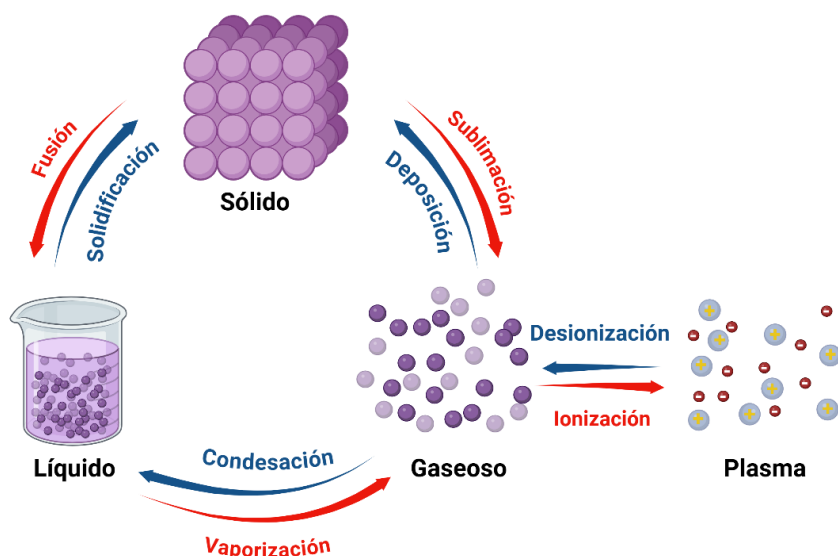
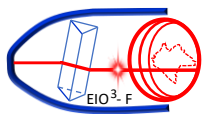


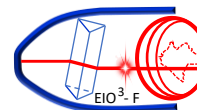
Figura 1. Transición entre los cuatro estados de la materia.

2.2. Clasificación del plasma.

En general, los plasmas pueden subdividirse entre plasmas que están en equilibrio térmico (**plasma térmico**) y aquellos que no lo están (**plasma no térmico o "frío"**). En plasmas térmicos, la temperatura de todas las especies (electrones, iones, especies neutras) es la misma, es decir, existe un equilibrio termodinámico entre electrones y otras especies, esto es, el flujo de energía de los electrones a las partículas pesadas equilibra el flujo de energía de las partículas pesadas al entorno solo cuando la temperatura de las partículas pesadas se vuelve casi igual a la temperatura de los electrones. En todos los plasmas soportados por un campo eléctrico, los electrones reciben la energía externa mucho más rápido que los iones mucho más pesados y tienen la oportunidad de calentarse a varios miles de grados antes de que su entorno se caliente. En el plasma no térmico (frío), el enfriamiento de los iones y las moléculas sin carga es más eficaz que la transferencia de energía de los electrones y el gas permanece a baja temperatura. Por esta razón, el plasma no térmico también se denomina plasma de no equilibrio. (Bogaerts et al., 2002; Fridman et al., 2008) Anteriormente, los plasmas fríos se generaban únicamente en condiciones de baja presión. Sin embargo, los avances recientes en la física e ingeniería de plasmas han permitido la generación de plasmas fríos a presión atmosférica, lo que ha impulsado significativamente la investigación sobre plasmas en la interfaz de las ciencias de la vida. (Segat et al., 2016) El diseño y el control de fuentes de plasma que operan a presión atmosférica o cercana a ella resultan de interés, tanto técnico como comercial, para la industria alimentaria, ya que no requieren condiciones de procesamiento extremas, como altas temperaturas y presiones (Misra et al., 2016).

Dependiendo de las condiciones de presión, el plasma también se puede clasificar como **plasma de alta presión, presión atmosférica y baja presión**. En el plasma a presión atmosférica, el plasma se genera a la presión atmosférica normal, lo que elimina la necesidad de costosas cámaras de reacción para mantener la presión. (Pankaj et al., 2018)

El sistema plasma frío de alto voltaje, HVCP por sus siglas en inglés, se compone principalmente de una fuente de energía, un conjunto de electrodos (uno de alta tensión y otro conectado a tierra) y un gas portador. Su funcionamiento se basa en la generación de plasma mediante la interacción de gases ionizados con moléculas y átomos neutros, lo cual ocurre por ionización por impacto electrónico o por fotoionización, siempre que se aporte suficiente energía. Este proceso da lugar a la formación de electrones e iones. Todos los gases, ya sean utilizados de forma individual o combinada, tienen la capacidad de generar plasma, aunque la energía requerida varía según su potencial de ionización. (Olatunde et al., 2023) De acuerdo con esto, se establece otra categoría de clasificación de acuerdo con el gas empleado. Los gases portadores más comunes incluyen **gases reactivos** como el aire atmosférico, oxígeno, nitrógeno y **gases nobles** como el argón (Ar) y el helio (He). En el ámbito del procesamiento de alimentos, el aire atmosférico suele emplearse por su bajo costo; sin embargo, su uso puede provocar una oxidación intensa de lípidos y proteínas, lo que



podría afectar negativamente las características sensoriales y fisicoquímicas del producto final. Por esta razón, en aplicaciones alimentarias donde se busca minimizar la degradación oxidativa, se ha adoptado el uso de gases nobles como portadores en sistemas HVCP. (Mao et al., 2021; Misra et al., 2015). Las distintas clasificaciones se resumen en el mapa conceptual de la Fig. 2.

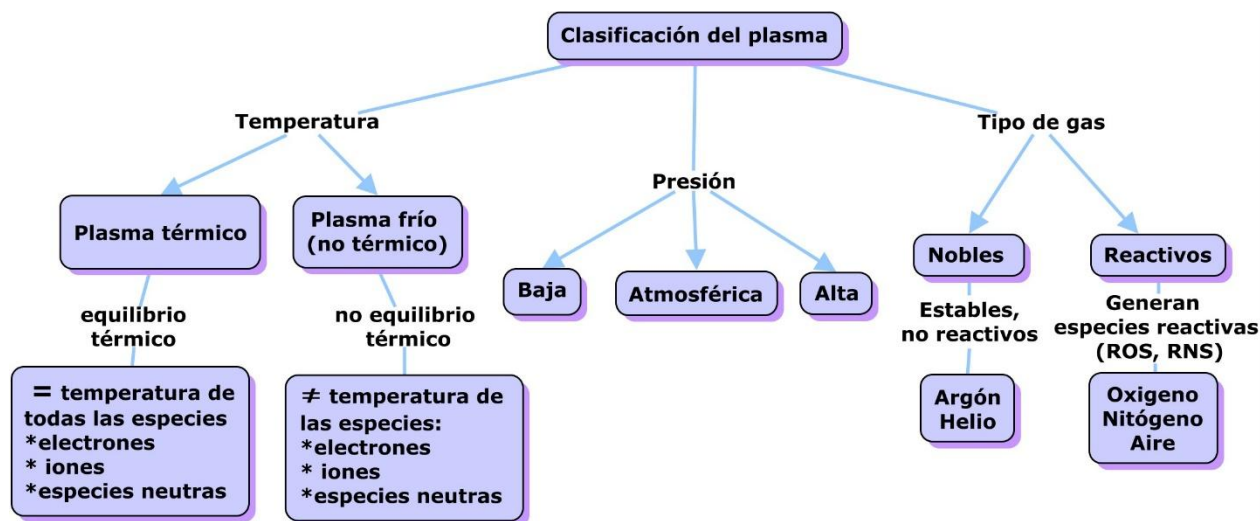


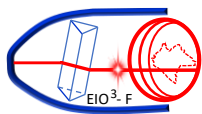
Figura 2. Clasificación del plasma.
ROS: Especies reactivas del oxígeno, RNS: especies reactivas del nitrógeno.

2.3. Aplicaciones generales del plasma frío.

El plasma frío se presenta como una tecnología emergente de gran versatilidad, capaz de transformar múltiples sectores industriales y ambientales. En el ámbito **electrónico y óptico**, se utiliza para limpiar componentes ópticos y semiconductores con alta precisión, evitando daños térmicos y el uso de químicos agresivos. En la **industria automotriz**, mejora la adhesión de recubrimientos y elimina contaminantes en piezas metálicas, reduciendo riesgos de corrosión y sustituyendo procesos químicos tradicionales. El sector **aeroespacial** aprovecha esta tecnología para descontaminar componentes críticos y preparar superficies para recubrimientos funcionales que resisten condiciones extremas. Además, en **medio ambiente**, contribuye a la degradación de pesticidas y microorganismos en aguas residuales y a la reducción de contaminantes gaseosos como NOx (óxidos de nitrógeno) y COV (compuestos orgánicos volátiles), ofreciendo soluciones sostenibles. Su aplicación también se extiende a la **conservación del patrimonio**, donde permite restaurar artefactos y obras delicadas sin comprometer su integridad, y a los **materiales de embalaje**, mejorando la adherencia de tintas y asegurando la esterilización de envases sin calor ni químicos. Estas características posicionan al plasma frío como una herramienta innovadora para procesos más seguros, eficientes y respetuosos con el medio ambiente. (Nwabor et al., 2022; Sun et al., 2025)

2.4. Fuentes del plasma Frío en alimentos.

Los campos eléctricos o electromagnéticos se utilizan ampliamente para la generación de plasma frío (PF). La versatilidad de las fuentes de generación de PF permite diseños únicos que son compatibles con los equipos actuales de la industria alimentaria. Los métodos de generación de plasma más utilizados en el procesamiento de alimentos se clasifican en **descarga de barrera dieléctrica (DBD)**, chorro de plasma, descarga de corona, radiofrecuencia y microondas. En particular, los sistemas más empleados son la descarga con barrera dieléctrica (DBD) y el plasma de chorro (Fig. 3). Los dispositivos DBD constan de dos electrodos metálicos, de los cuales al menos uno está recubierto con una barrera dieléctrica, es decir, un material aislante, que impide el paso directo de corriente eléctrica (como cerámica, cuarzo o vidrio), dicho electrodos se encuentran separados por un espacio variable (desde 0,1 mm hasta varios centímetros). Estas barreras dieléctricas actúan como estabilizadores del sistema, ya que evitan la transición de arco, un fenómeno en el que la descarga eléctrica se vuelve intensa, localizada y extremadamente caliente, lo que puede



dañar los materiales tratados y comprometer la uniformidad del proceso. En lugar de generar un arco eléctrico, los dispositivos DBD producen una gran cantidad de micro descargas distribuidas uniformemente, lo que permite un tratamiento más homogéneo, seguro y controlado. El sistema DBD ofrece diversas aplicaciones gracias a su configuración y flexibilidad en la forma del electrodo y el material dieléctrico utilizado. En la **Fig. 3a** puede observarse el esquema de un sistema de descarga dieléctrica (DBD) donde el electrodo superior está cubierto con una barrera dieléctrica, y el electrodo inferior sirve como electrodo de tierra. Al mismo tiempo, el electrodo de tierra sirve como soporte de muestras, ya que los materiales que se van a tratar quedan atrapados entre los electrodos. Por otro lado, los **dispositivos de chorro de plasma** (**Fig. 3b**) están compuestos por dos electrodos concéntricos, donde el electrodo interno suele estar conectado a una fuente de radiofrecuencia de alta frecuencia que ioniza el gas de trabajo. Este gas ionizado se expulsa por una boquilla, generando una apariencia de “chorro” que puede aplicarse directamente sobre la superficie del alimento. El chorro de plasma produce una descarga estable, homogénea y uniforme a presión atmosférica. Este plasma es limitado cuando se dirige a un área extensa, pero en este caso se debe aplicar la disposición de varios chorros. Aunque numerosos estudios han examinado el plasma de chorro en aplicaciones alimentarias, su uso a escala industrial es poco viable debido a que solo puede tratar superficies muy pequeñas, del orden de mm². Sin embargo, el concepto de plasma de chorro se ha revitalizado para su uso en columnas de burbujeo para tratar alimentos líquidos o producir agua activada por plasma. En este nuevo concepto, el plasma se genera dentro de un tubo y luego se introduce en un recipiente o reactor que contiene un líquido. Aunque no se usa comúnmente en las industrias alimentarias, el **sistema de descarga de microondas** produce plasma de cuasi-equilibrio y no-equilibrio para aplicaciones industriales y médicas. Aquí, el plasma se genera con ondas electromagnéticas que superan los 300 MHz.

La principal ventaja de este sistema es que no requiere un electrodo similar al DBD o al sistema de plasma de chorro. El **sistema de plasma de descarga de corona** tiene más aplicaciones en la industria textil, el medio ambiente y el uso médico. Los electrodos de corona reciben ese nombre porque generan un fenómeno llamado descarga de corona, que ocurre cuando un electrodo con alto voltaje produce una intensa ionización del gas circundante en una región muy localizada, creando un halo luminoso similar a una “corona”. Cuando se aplica un alto voltaje a un electrodo con geometría puntiaguda o con bordes afilados, el campo eléctrico cerca de la superficie es extremadamente intenso. Esto provoca que las moléculas del gas se ionicen, liberando electrones y formando plasma. La ionización no ocurre de manera uniforme en todo el electrodo, sino en zonas específicas donde el campo eléctrico es más fuerte (puntas, bordes). Esto produce un resplandor visible alrededor del electrodo, parecido a una corona luminosa. La ventaja de este sistema es la instalación simple y de bajo costo; sin embargo, su aplicación en alimentos es limitada debido a la falta de uniformidad y la menor área de contacto. Como su nombre indica, un **sistema de descarga por radiofrecuencia** genera plasma mediante radiofrecuencia en lugar de la descarga de corriente empleada por otros métodos. En pocas palabras, este sistema genera plasma sin electrodos, lo que evita la contaminación por vapor metálico. Además, la radiofrecuencia ofrece otras ventajas, como una alta eficiencia de producción y un bajo costo para aplicaciones industriales en comparación con otros sistemas de plasma. Los sistemas de radiofrecuencias no son tan populares en alimentos entre otras cosas porque son difíciles de escalar, esto es, presentan limitaciones para ser aplicados en grandes volúmenes o productos con geometrías complejas, al necesitar condiciones controladas (cámaras cerradas, vacío parcial), son más difícil de integrar en una línea de producción de alimentos. (Fernandes & Rodrigues, 2024; Olatunde et al., 2023; Pankaj et al., 2018)

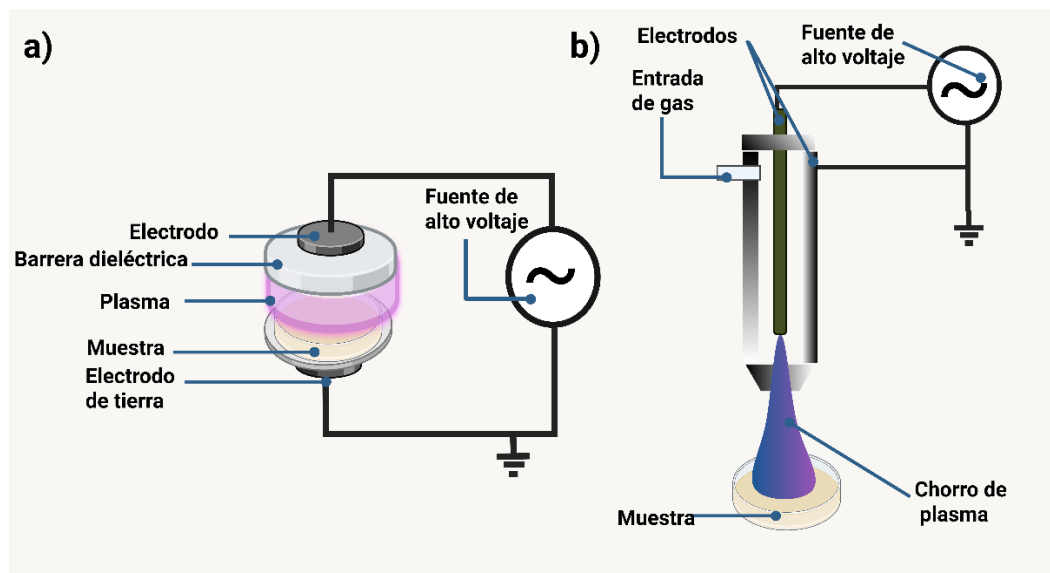
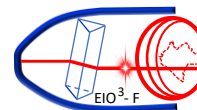


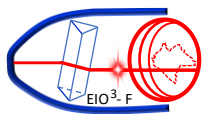
Figura 3. Esquema de (a) descarga de barrera dieléctrica; y (b) chorro de plasma.

2.5. Aplicaciones del plasma frío en alimentos.

El plasma frío se ha convertido en una tecnología emergente con gran potencial en la industria alimentaria, ofreciendo soluciones innovadoras para la **inactivación de microorganismos** y la extensión de la vida útil sin recurrir a tratamientos térmicos que comprometan la calidad. Su aplicación incluye la descontaminación de frutas y vegetales frescos, como lechuga, tomates y bayas, donde logra reducciones significativas de bacterias patógenas y virus sin alterar la textura ni el sabor. En productos líquidos, como jugos y leche, el plasma frío asegura la inocuidad al eliminar microorganismos mientras preserva nutrientes y compuestos bioactivos. También se emplea en productos cárnicos y lácteos, reduciendo la carga microbiana en quesos, carnes y huevos sin generar residuos químicos. Además, esta tecnología contribuye a la **reducción de alérgenos y toxinas en alimentos**, así como a la **inactivación enzimática**, mejorando la estabilidad y calidad del producto. Gracias a su carácter no térmico, el plasma frío responde a la demanda de alimentos seguros, frescos y mínimamente procesados, posicionándose como una herramienta clave para la sostenibilidad y la innovación en el sector alimentario. (Misra et al., 2016; Olatunde et al., 2023)

Como se ha señalado anteriormente, el PF es el resultado de una descarga eléctrica en un gas portador que provoca la ionización del aire atmosférico. Como resultado, el efecto de **inactivación microbiana** del tratamiento con plasma puede atribuirse a la presencia y formación de una serie de productos antimicrobianos en el aire, como la radiación UV, el ozono, las partículas cargadas y el oxígeno sobrecargado (iones del plasma). Todos estos productos actúan conjuntamente para eliminar patógenos como bacterias y virus. Cuando las moléculas de nitrógeno y oxígeno están presentes en la fase gaseosa, los electrones energéticos chocan con ellas a lo largo de su trayectoria y una cascada de reacciones enlazadas da como resultado la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). En particular, en presencia de oxígeno, se crean radicales hidroxilos ([•]OH) y ozono (O₃), que representan los más agresivos entre otras especies químicas activas. Los radicales hidroxilos ([•]OH) también pueden contribuir a la formación de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) e iones hidronio (H₃O⁺) que normalmente se obtienen en presencia de agua (humedad del gas, humedad superficial del alimento o fase acuosa de la muestra). Además de estas especies, la radiación ultravioleta (UV) y las partículas cargadas también pueden influir en el efecto plasma global.

El efecto inactivador del tratamiento con plasma se debe a una combinación de mecanismos. Estos mecanismos incluyen la radiación UV, que daña el ADN y las proteínas de los microorganismos; el grabado superficial, que descompone físicamente las paredes celulares (grabado hace referencia a la remoción parcial o modificación de la capa superficial, por ejemplo, la pared celular o la membrana externa); y la oxidación producida por especies reactivas, partículas cargadas y ozono, que altera las funciones celulares. Esta combinación sinérgica de procesos elimina



eficazmente los microorganismos y patógenos de las superficies tratadas. El efecto letal del plasma no térmico se produce por la exposición directa o indirecta de los productos alimenticios al gas de alimentación. (Misra et al., 2016) La eficacia antimicrobiana del plasma frío depende de factores como la humedad del alimento, ya que el agua favorece la formación de especies reactivas como H_2O_2 y radicales $\text{OH}^\cdot$, lo que incrementa la inactivación microbiana. (Laroque et al., 2022). El principal mecanismo de inactivación microbiana puede variar entre los sistemas de plasma. En sistemas que producen radiación UV, este puede ser el principal mecanismo de inactivación, ya que los fotones UV transmitidos en la descarga de plasma corresponden a la banda de absorción de los ácidos nucleicos.

Cuando se produce una descarga de plasma en aire húmedo, se forman radicales $\text{NO}^\cdot$ y $\text{OH}^\cdot$. Las altas concentraciones de $\text{NO}^\cdot$ reducen el pH del ambiente debido a la formación de HNO_2 y HNO_3 . Si la acidificación es rápida (el pH disminuye de 7,0 a 4,0 en hasta 20 minutos), las bacterias y otros microbios no tienen tiempo de adaptarse y mueren.

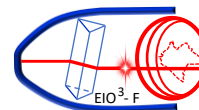
Los radicales $\text{OH}^\cdot$ y $\text{O}^\cdot$ pueden dañar las células celulares. Altas concentraciones de radicales $\text{OH}^\cdot$ actúan como un potente oxidante, induciendo una rápida degradación de la materia orgánica y pueden oxidar los ácidos grasos insaturados en la bicapa lipídica de las paredes celulares, oxidar los cambios laterales de aminoácidos y romper enlaces peptídicos. Los radicales $\text{O}^\cdot$ pueden oxidar proteínas e intervenir en el proceso de grabado. Los radicales $\text{OH}^\cdot$ se combinan con H_2O_2 en un medio acuoso, que también es un agente oxidante con alta actividad esterilizante. Estas especies reactivas inducen alteraciones en las actividades enzimáticas, peroxidación de lípidos, degradación de proteínas y alteraciones del ADN. Las especies reactivas de nitrógeno causan estrés oxidativo, dañando diversas estructuras celulares, incluyendo lípidos, membranas, proteínas y ADN. (Fernandes & Rodrigues, 2024)

Las enzimas presentes en frutas, verduras y otros productos catalizan reacciones que deterioran la calidad durante el almacenamiento, provocando cambios en color, sabor, aroma y pérdida de valor nutricional. Estas reacciones incluyen el pardeamiento enzimático y la degradación de compuestos sensibles, afectando la estabilidad y aceptación del alimento. Por ello, la inactivación enzimática es esencial para prolongar la vida útil, mantener características sensoriales y garantizar la seguridad del producto. (Fernandes & Rodrigues, 2024)

La **inactivación enzimática** mediante plasma frío se basa en procesos físico-químicos que alteran la estructura proteica. El mecanismo principal involucra el ataque de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS y RNS), como radicales hidroxilo, ozono y peróxidos, que inducen la ruptura de enlaces peptídicos y modifican cadenas laterales de aminoácidos. Estas reacciones provocan cambios en la estructura secundaria, reduciendo el contenido de hélice α y aumentando las láminas β , lo que compromete la funcionalidad enzimática. Además, la radiación UV emitida por el plasma contribuye a la foto degradación de aminoácidos aromáticos (tirosina, triptófano), acelerando la desnaturalización. La sinergia entre oxidación química y fotólisis genera agregación, fragmentación y pérdida de actividad catalítica. La eficacia depende de parámetros como voltaje, tiempo de exposición, composición del gas y densidad de especies reactivas, que determinan la intensidad del estrés oxidativo y la profundidad de las modificaciones estructurales. (Laroque et al., 2022)

El PF puede intervenir en la **reducción de toxinas (micotoxinas y pesticidas)**, su mecanismo de acción se basa en la ruptura de enlaces insaturados y funcionales mediante ataques de radicales como $\cdot\text{OH}$, O_3 y $\text{NO}^\cdot$, así como en la ionización y escisión fotoquímica de enlaces $\text{C}=\text{C}$ y $\text{C}-\text{O}$. En plaguicidas, estas interacciones promueven reacciones de oxidación y fragmentación molecular, reduciendo dichos compuestos. De forma similar, las micotoxinas (aflatoxinas, fumonisinas, zearalenona) son degradadas por especies reactivas y radiación UV, generando productos menos tóxicos que la molécula original. Este enfoque ofrece una alternativa sostenible para la descontaminación de alimentos, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sin comprometer la calidad sensorial del producto. (Fernandes & Rodrigues, 2024; Laroque et al., 2022; Misra et al., 2019)

La **alergenicidad de las proteínas** puede **reducirse** mediante modificaciones estructurales y químicas a casusa del PF. Las especies reactivas generadas durante el tratamiento inducen la oxidación de aminoácidos sensibles como cisteína, tirosina y triptófano, así como la ruptura de enlaces disulfuro y peptídicos. Estos cambios alteran la conformación secundaria, disminuyendo el contenido de α -hélice y aumentando las hojas β , lo que provoca la fragmentación de epítopes responsables de la interacción con anticuerpos IgE/IgG. Como resultado, se ha observado una reducción significativa de la capacidad alergénica en proteínas vegetales (soja, maní) y animales (caseína, tropomiosina). (Laroque et al., 2022)



El PF puede **mejorar la digestibilidad de proteínas** al inducir modificaciones estructurales mediante especies reactivas que desnaturalizan y despliegan la estructura proteica, exponiendo sitios de corte antes inaccesibles para las enzimas digestivas. Además, este tratamiento reduce factores anti nutricionales como inhibidores de proteasas (por ejemplo, inhibidor de tripsina en soja) y fragmenta proteínas resistentes, lo que facilita su hidrólisis. También oxida compuestos fenólicos como taninos, evitando la formación de complejos proteína-polifenol que limitan la acción enzimática. En conjunto, estos efectos incrementan la accesibilidad de las proteínas a las peptidasas, favoreciendo su aprovechamiento nutricional y potencial funcional en alimentos.(Olatunde et al., 2023).

Diversos estudios han revisado el uso del plasma frío para la descontaminación microbiológica de alimentos. Más allá de su aplicación en la eliminación de microorganismos, el plasma frío generado a presión atmosférica ha demostrado un notable potencial en múltiples aplicaciones innovadoras. Entre ellas se destacan la mejora de la hidrofobicidad superficial en productos horneados como galletas, la modificación de las propiedades reológicas y de mezclado de masas, la optimización funcional de proteínas de suero, el mejoramiento del rendimiento tecnológico de harinas de arroz, así como el incremento en la germinación de granos y semillas. (Misra et al., 2016)

Conclusiones.

El plasma frío se perfila como una tecnología sostenible y eficiente para la industria alimentaria. Su uso de energía eléctrica en lugar de combustibles fósiles contribuye a reducir las emisiones de CO₂, mientras que la ausencia de efluentes y ciclos de limpieza repetitivos, característicos de procesos químicos, refuerza su carácter ecológico. Además, la acción de especies altamente reactivas evita la generación de residuos químicos, posicionando al plasma frío como una alternativa respetuosa con el medio ambiente.

Este trabajo resalta la versatilidad del plasma frío, con aplicaciones que abarcan desde la inocuidad microbiológica hasta la modificación de propiedades fisicoquímicas en matrices alimentarias. Aunque se trata de una tecnología en desarrollo, los avances en la comprensión de sus mecanismos y en la optimización de parámetros operativos impulsarán su integración en la industria, ofreciendo alimentos más seguros y de mayor calidad frente a los procesos térmicos convencionales.

De cara al futuro, será esencial profundizar en los efectos del plasma sobre compuestos específicos y macronutrientes críticos, así como abordar retos relacionados con el escalado industrial, la regulación normativa y la exploración de nuevas aplicaciones. Estos esfuerzos consolidarán al plasma frío como una herramienta clave para la innovación y la sostenibilidad en el procesamiento de alimentos.

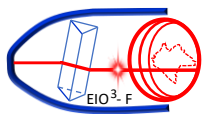
Créditos.

El autor agradece al Programa de Investigación de Canadá por el financiamiento del proyecto.

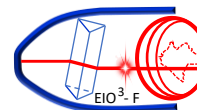
Figuras Creadas en BioRender y Cmap, <https://cmap.ihmc.us/>

Referencias bibliográficas.

- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., & van der Mullen, J. (2002).** Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 57(4), 609–658. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00406-2)
- Chang, R., & College, W. (2002).** Química (F. H. Carrasco (ed.); Septima). McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Cherif, M. M., Assadi, I., Khezami, L., Ben Hamadi, N., Assadi, A. A., & Elfalleh, W. (2023).** Review on Recent



- Applications of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production: Principles, Implementation, and Application Limits. *Applied Sciences*, 13(4), 2381. <https://doi.org/10.3390/app13042381>
- Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2024).** Cold plasma technology for sustainable food production: meeting the United Nations sustainable development goals. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 32–53. <https://doi.org/10.1039/d4fb00209a>
- Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N., & Fridman, A. (2008).** Applied Plasma Medicine. *Plasma Processes and Polymers*, 5(6), 503–533. <https://doi.org/10.1002/ppap.200700154>
- Knorr, D., & Augustin, M. A. (2021).** Food processing needs, advantages and misconceptions. *Trends in Food Science & Technology*, 108(December 2020), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.026>
- Laroque, D. A., Seo, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022).** Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering*, 312(April 2021), 110748. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748>
- Mao, L., Mhaske, P., Zing, X., Kasapis, S., Majzoobi, M., & Farahnaky, A. (2021).** Cold plasma: Microbial inactivation and effects on quality attributes of fresh and minimally processed fruits and Ready-To-Eat vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 116(July), 146–175. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.002>
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Frias, J. M., Keener, K. M., & Cullen, P. J. (2015).** The effects of nonthermal plasma on chemical quality of strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, 110, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.023>
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016).** Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science and Technology*, 55, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.001>
- Misra, N. N., Tiwari, B. K., & Cullen, P. J. (2019).** Cold plasma for mycotoxin degradation: Mechanisms and applications. *Food and Bioprocess Technology*, 12(4), 543–558. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02260-4>
- Nwabor, O. F., Onyeaka, H., Miri, T., Obileke, K., Anumudu, C., & Hart, A. (2022).** A Cold Plasma Technology for Ensuring the Microbiological Safety and Quality of Foods. *Food Engineering Reviews*, 14(4), 535–554. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09316-0>
- Olatunde, O. O., Hewage, A., Dissanayake, T., Aluko, R. E., Karaca, A. C., Shang, N., & Bandara, N. (2023).** Cold atmospheric plasma-induced protein modification: Novel nonthermal processing technology to improve protein quality, functionality, and allergenicity reduction. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 2197–2234. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13144>
- Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018).** Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/foods7010004>
- Segat, A., Misra, N. N., Cullen, P. J., & Innocente, N. (2016).** Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) on activity and structure of alkaline phosphatase. *Food and Bioprocess Processing*, 98, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.01.010>
- Sun, J., Yu, Y., Tang, J., Zeng, Y., & Chen, J. (2025).** Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications. *IEEE Access*, 13(January), 37221–37242. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532662>



Biografía del investigador.



Dra. Mariela Rodríguez, Investigadora Posdoctoral en Ciencias de la Nutrición Humana en la Universidad de Manitoba. Es especialista en proteínas vegetales, péptidos bioactivos y compuestos fenólicos, con enfoque en tecnologías verdes para el desarrollo de ingredientes funcionales sostenibles. Su tesis doctoral (Ciencias Biológicas, UNLP, Argentina), titulada “Evaluación de la harina de amaranto como ingrediente antioxidante para la preparación de matrices alimentarias funcionales”, combinó metodologías *in vitro* e *in vivo* para evaluar el potencial antioxidante de ingredientes a base de amaranto y subproductos, como el orujo de uva. Ha sido reconocida con premios internacionales por la calidad e impacto de su investigación, y es autora principal en múltiples publicaciones científicas en revistas de alto impacto como *Food Research International*, *Food & Function* y *Plant Foods for Human Nutrition*. Actualmente, colabora con equipos de investigación en Canadá, Italia y Argentina, promoviendo la innovación en el sector agroalimentario.

Sensor de pH basado en fibra óptica con cubierta de grafeno.

pH sensor based on optical fiber coated with graphene.

Alondra Jaqueline Sánchez Martínez (1).
Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH.
alondra.sanchez.mtz@gmail.com.

Daniel López Cortés* (2). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, daniel.lopezc@unach.mx.

Víctor Iván Ruiz Pérez (3). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, vruiz@unach.mx.

Gilbert Francis Pérez García (4). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, gilbert.perez@unach.mx.

Ariel Flores Rosas (5). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, ariel.flores@unach.mx.

Luis Escalante Zárate (6). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, UNACH, luis.escalantez@unach.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 05, 2025; aceptado en octubre 03, 2025.

Resumen.

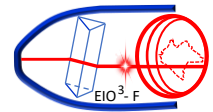
El trabajo presenta el diseño, fabricación y caracterización de un sensor de pH basado en fibra óptica, utilizando una configuración de desalineamiento entre núcleos de dos fibras monomodo. El dispositivo está orientado a aplicaciones en el monitoreo de la calidad del agua, permitiendo medir el pH en un rango de 7 a 12. Para mejorar la sensibilidad del sistema, se incorporó una capa de grafeno sobre la región sensora, lo que permite una mejor interacción con el medio exterior. La configuración propuesta destaca por su bajo costo y facilidad de fabricación, debido a que no requiere fibras ópticas especiales ni equipos sofisticados, lo que la hace viable para ser implementada en laboratorios convencionales y entornos con recursos limitados.

Palabras claves: Fibra óptica, grafeno, sensor de fibra óptica, sensor de pH.

Abstract.

This work presents the design, fabrication, and characterization of a pH sensor based on optical fiber, using a configuration involving core misalignment between two single-mode fibers. The device is aimed at applications in water quality monitoring, enabling pH measurements in the 7 to 12 range. To enhance the sensor's sensitivity, a layer of graphene was incorporated over the sensing region, allowing improved interaction with the external medium. The proposed configuration stands out for its low cost and ease of fabrication, as it does not require specialized optical fibers or complex equipment, making it suitable for implementation in conventional laboratories and resource-limited environments.

Keywords: Fiber optic, fiber optic sensor, graphene, pH sensor.



1. Descripción de la conferencia

El cuidado de los recursos hídricos se ha convertido en una de las prioridades más urgentes de nuestro tiempo. La creciente escasez de agua en muchas regiones del planeta ha impulsado la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan no solo conservar este recurso, sino también asegurar su calidad. La evaluación de parámetros como la turbidez, la salinidad, la presencia de metales pesados y el pH es fundamental para determinar si el vital líquido es apto para consumo humano, el riego agrícola o el uso industrial (Chen et al., 2020).

Ante esta necesidad, la comunidad científica ha intensificado la búsqueda de métodos cada vez más precisos, confiables y accesibles para la monitorización de la calidad del agua. En este contexto, los sensores basados en fibra óptica han ganado una gran atención, gracias a sus ventajas inherentes: son inmunes a la interferencia electromagnética, permiten la multiplexación (medición de varios parámetros con un solo sistema), presentan alta resistencia a los ambientes corrosivos y pueden operar de forma remota y en tiempo real (Wang et al., 2018).

De forma paralela, el descubrimiento y estudio de nuevos materiales como el grafeno ha abierto abanico de posibilidades en el desarrollo de dispositivos fotónicos. El grafeno, con sus excepcionales propiedades eléctricas, térmicas y ópticas, ha demostrado ser un aliado ideal en el diseño de sensores con mayor sensibilidad, duraderos y sobre todo versátiles, especialmente cuando se combinan con tecnologías ópticas como la fibra óptica (Bonaccorso et al., 2010; Sharma & Kaushik, 2017).

En este trabajo se presenta el diseño, fabricación y caracterización de un sensor de pH basado en una configuración tipo interferómetro de Michelson, que utiliza el desalineamiento entre los núcleos de dos fibras monomodo como elemento base para generar interferencia. En el sistema se incorpora una capa de grafeno, lo cual mejora significativamente la respuesta óptica del sensor frente a variaciones en el pH. Esta propuesta destaca por su simplicidad de fabricación, bajo costo y potencial para ser implementada en entornos reales donde se requiere monitoreo constante de la calidad del agua.

2. Métodos.

1. Diseño del sensor.

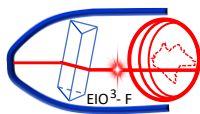
El sensor propuesto se basa en una configuración tipo Interferómetro de Michelson (IM), implementada mediante el desalineamiento axial entre los núcleos de dos fibras ópticas monomodo (SMF-28). Esta técnica consiste en unir dos fibras dejando intencionalmente sus núcleos desalineados, lo cual genera una interferencia entre el modo fundamental y los modos acoplados. El extremo distal de la fibra actúa como un espejo, de modo que la señal reflejada vuelve por la misma trayectoria. La intensidad y fase de la señal reflejada varían según las condiciones de la interfaz entre el vidrio y el medio exterior, generando un patrón interferométrico característico.

2. Recubrimiento con grafeno.

Para mejorar la sensibilidad del sensor frente a cambios en el pH, se utilizó una capa de grafeno sintetizado mediante deposición química en fase de vapor (CVD, por sus siglas en inglés). Esta técnica permite obtener láminas delgadas, continuas y de alta calidad de grafeno con excelentes propiedades estructurales, eléctricas y ópticas, ideales para su integración en dispositivos fotónicos (Bonaccorso et al., 2010; Li et al., 2009).

El grafeno CVD fue adquirido comercialmente, el cual se entrega depositado sobre un sustrato de cobre. Por esta razón se utilizó el proceso de transferencia húmeda para trasladar cuidadosamente la lámina de grafeno a la punta de la fibra óptica, la cual se encuentra a una distancia L específica del desalineamiento entre núcleos. Este procedimiento, ampliamente empleado en la investigación de materiales bidimensionales, incluye las siguientes etapas:

1. Recubrimiento del grafeno con una capa protectora de polímero, como polimetilmetacrilato (PMMA).
2. Corrosión del sustrato metálico utilizando una solución de persulfato de amonio.
3. Lavado con agua desionizada para eliminar residuos de cobre.
4. Transferencia del grafeno recubierto de PMMA sobre la superficie de la punta de la fibra óptica.



5. Secado y remoción del PMMA utilizando acetona, dejando la lámina de grafeno directamente adherida a la fibra (Reina et al., 2008; Suk et al., 2011).

Este método permite una buena adherencia y cobertura del grafeno sobre superficies curvas y pequeñas como la punta de la fibra óptica, conservando su integridad estructural. Gracias a su alta sensibilidad superficial y a su interacción con compuestos químicos presentes en el medio (como los iones H^+), el grafeno modula las propiedades ópticas locales. Esto se traduce en un cambio medible en el espectro de interferencia del sensor, lo que permite la detección precisa del pH.

3. Rango de medición y soluciones de prueba.

El sensor fue probado en soluciones con valores de pH entre 7 y 12, validados con un pH-metro comercial, ya que este rango es crítico para aplicaciones en monitores de agua potable, aguas residuales e industriales.

4. Sistema de medición.

Para evaluar la respuesta del sensor, se utilizó una fuente de luz de banda ancha (Diodo superluminiscente, SLD por sus siglas en inglés) y un analizador de espectros ópticos (OSA) para registrar los cambios en el espectro de interferencia reflejado. A medida que el pH del medio cambiaba, se observaban una disminución de la intensidad en el espectro de interferencia, permitiendo correlacionar dichos cambios con los valores de pH. Cada medición se repitió tres veces para verificar la repetibilidad y estabilidad del sensor. También se midió el tiempo de respuesta y recuperación ante cambios bruscos de pH.

3. Desarrollo.

1. Configuración del sensor.

El sensor se basa en una estructura tipo interferómetro de Michelson, utilizando dos segmentos de fibra óptica monomodo unidos mediante una fusión con desalineamiento entre sus núcleos (Ver Fig. 1).

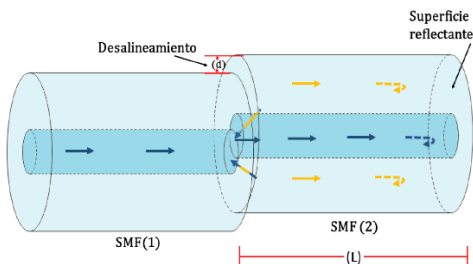


Figura 1. Estructura del sensor tipo interferómetro de Michelson.

Esta configuración permite generar interferencias entre el modo fundamental y modos de orden superior, los cuales son sensibles a variaciones del índice de refracción en la interfaz reflejante de vidrio-aire que se encuentra en la punta de la fibra, la cual actúa como zona sensora, y es donde se depositó una capa de grafeno sintetizado por CVD, cubriendo totalmente la punta de la fibra. Esta capa permite que el sensor sea sensible a la concentración de iones de hidrógeno (H^+), lo que posibilita detectar cambios en el pH del medio líquido.

2. Proceso de fabricación.

La construcción del sensor se llevó a cabo en cuatro etapas principales:

Fusión con desalineamiento: Se utilizó una empalmadora convencional Fujikura 70s+ operando en modo manual, para unir dos fibras monomodo, con un desplazamiento transversal de aproximadamente $2 \mu m$ entre sus núcleos, generando un acoplamiento parcial de la luz a modos no guiados. En la Fig. 2 se presenta el proceso de desalineamiento entre núcleos.

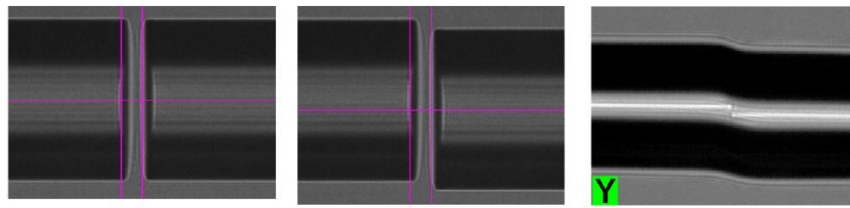


Figura 2. Etapas para la implementación del desalineamiento de núcleos entre fibras monomodo.

Preparación del grafeno: El grafeno fue obtenido comercialmente, este es generado mediante deposición química en fase de vapor (CVD) sobre un sustrato de cobre y así es como se adquiere.

Transferencia de grafeno: Se aplicó una técnica de transferencia húmeda, en la cual se usa PMMA como polímero de sacrificio para depositar cuidadosamente la lámina de grafeno sobre la punta de la fibra. En la **Fig. 3** se muestra el PMMA con grafeno depositado en la punta de la fibra.

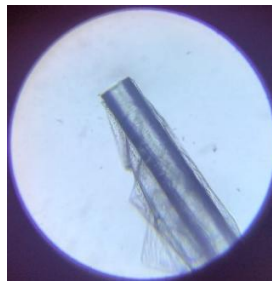


Figura 3. PMMA y grafeno transferido en la punta de la fibra.

Limpieza y secado: Una vez transferido, se eliminó el PMMA con acetona, dejando grafeno firmemente adherido a la cara cortada de la fibra.

3. Montaje del sistema de medición.

Como se muestra en la **Fig. 4**, para la caracterización del sensor, se utilizó una fuente de luz de banda ancha (diodo superluminiscente) acoplada a través de un circulador óptico al sensor. La señal reflejada fue monitoreada mediante un analizador de espectros ópticos (OSA), permitiendo registrar el cambio de intensidad producido por las variaciones de pH de cada solución en la que se sumergía el sensor.

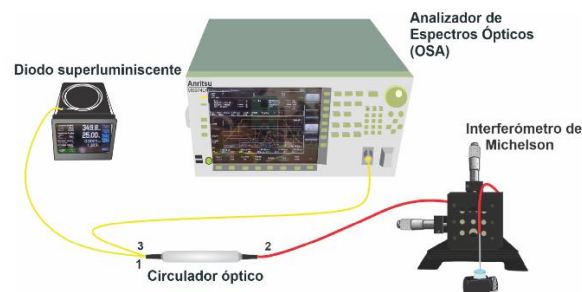
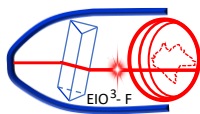


Figura 4. Montaje usado para la caracterización del sensor de pH.



Las pruebas se realizaron con soluciones con un rango de pH de 7 a 12, representativo de condiciones reales de agua potable, aguas residuales y cuerpos de agua naturales.

4. Resultados.

El sensor mostró una respuesta consistente frente a variaciones de pH en distintas soluciones, dentro del rango comprendido entre pH 7 y pH 12. Como se muestra en la **Fig. 5**, la señal interferométrica obtenida a través del analizador de espectros ópticos reveló un comportamiento característico: la intensidad de la señal reflejada disminuyó progresivamente a medida que aumentaba el pH de la solución en la que se encontraba sumergido el sensor.

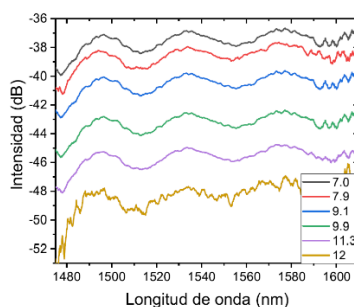


Figura 5. Espectros obtenidos ante variaciones de pH del sensor con una capa de grafeno.

Este fenómeno se interpreta como una atenuación óptica inducida por cambios en las propiedades del grafeno al interactuar con el entorno químico. A pH bajos (más ácidos), la concentración de protones (iones H^+) es mayor, lo que puede afectar la conductividad superficial y la constante dieléctrica del grafeno, disminuyendo su capacidad de absorber o dispersar la luz. A medida que el pH aumenta, el entorno se vuelve más básico y la interacción con el grafeno cambia, lo que conduce a un incremento en la pérdida óptica en la región sensora.

El análisis espectral mostró que, aunque no se produjo un desplazamiento significativo en la longitud de onda central, el sensor respondió de manera medible y sistemática a los cambios de pH a través de la variación en la amplitud de la señal reflejada, con una sensibilidad de -2.30603 dB/pH . Esta característica puede ser aprovechada para desarrollar sensores basados en intensidad, lo cual simplifica el sistema de lectura y reduce los costos de implementación en comparación con sensores de desplazamiento espectral. Además, como se muestra en la **Fig. 6**, en la caracterización se observó que la respuesta del sensor fue reversible y repetible al alternar soluciones con diferentes valores de pH, con tiempos de respuesta de 3 segundos y 9 segundos de recuperación, lo cual en comparación con los pH-metros convencionales lo hace notablemente más rápido, lo que lo hace un buen candidato para aplicaciones de monitoreo en tiempo real.

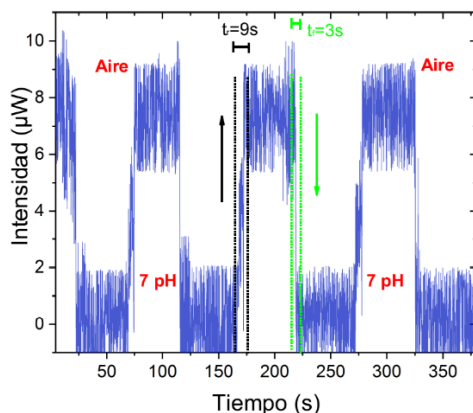
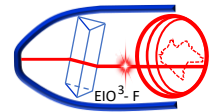


Figura 6. Tiempo de respuesta del sensor de pH.



Las variaciones de intensidad entre valores de pH de 7 y 12 fueron suficientemente estables para permitir una calibración confiable, evidenciando el potencial de esta tecnología para el sensado químico en líquidos.

Conclusiones.

Se desarrolló y caracterizó un sensor de pH basado en fibra óptica, utilizando una configuración interferométrica tipo Michelson con desalineamiento entre núcleos de fibras monomodo y una capa de grafeno CVD como elemento sensible. Este enfoque demostró ser efectivo, reproducible y de bajo costo, ya que no requiere fibras especiales ni equipos sofisticados para su fabricación.

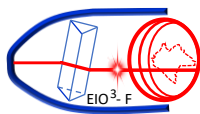
El sensor mostró una respuesta lineal frente a cambios en el pH, dentro del rango de 7 a 12, presentando una sensibilidad de -2.30603 dB/pH. Mediante una atenuación progresiva de la señal reflejada conforme aumentaba el pH.

Esta respuesta se atribuye a la interacción entre el grafeno y el medio químico circundante, que afecta las propiedades ópticas en la región sensora. Aunque no se observó un desplazamiento espectral significativo, la variación en la intensidad de la señal fue suficiente para establecer una correlación confiable con el valor de pH, lo cual habilita su uso como un sensor de intensidad. Además, el sensor presentó alta repetibilidad y tiempos de respuesta cortos, características deseables para su implementación en sistemas de monitoreo en tiempo real. Debido a su simplicidad estructural y la ventaja poder ser fabricado con recursos disponibles en cualquier laboratorio, este tipo de sensor representa una alternativa viable para aplicaciones en control de calidad y otros entornos donde el pH es un parámetro crítico a ser determinado.

Como trabajo a futuro, se propone mejorar la estabilidad del recubrimiento de grafeno a largo plazo, explorar técnicas de funcionalización química para ampliar la sensibilidad en otros rangos de pH y, evaluar su desempeño en muestras reales con condiciones más complejas.

Referencias bibliográficas.

- Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., & Ferrari, A. C. (2010). *Graphene photonics and optoelectronics*. Nature Photonics, 4(9), 611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>.
- Cheng, C., Li, Y., & Zhang, Y. (2020). *Water quality monitoring using sensor networks: State of the art and future challenges*. Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08487-9>.
- Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M. S., & Kong, J. (2008). *Large area, few layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition*. Nano Letters, 9(1), 30-35. <https://doi.org/10.1021/nl801827v>.
- Sharma, A., & Kaushik, B. K. (2017). *Graphene-based optical sensors: A review*. Optics & Laser Technology, 91, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.022>.
- Suk, J. W., Kitt, A., Magnuson, C. W., Hao, Y., Ahmed, S., An, J.,... & Ruoff, R. S. (2011). *Transfer of CVD-grown monolayer graphene onto arbitrary substrate*. ACS Nano, 5(9), 6916-6924. <https://doi.org/10.1021/nn201207c>.
- Wang, Q., Yu, C., & Zhang, Y. (2018). *Optical fiber sensors for environmental monitoring: Current status and future perspectives*. Sensors, 18(10), 3335. <https://doi.org/10.3390/s18103335>.



Biografías de los investigadores.



Alondra Jaqueline Sánchez Martínez, en el año 2023 obtuvo el grado de Maestra en Ciencias Físicas por la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas, estudiando sensores interferométricos basados en fibra óptica, la interacción multimodal existente en ellos y sus aplicaciones. Ha participado en diversos congresos (LXV Congreso Nacional de Física, XX Participación de la Mujer en la Ciencia, etc.) y actualmente se encuentra cursando el Doctorado en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) bajo la misma área de investigación.



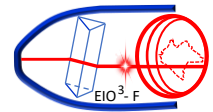
Daniel López Cortés, es doctor en ciencias por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE, 2012), tiene un posdoctorado de 3 años en el Instituto Mackenzie de investigación en Grafeno y Nanotecnologías, en São Paulo, Brasil y posteriormente un posdoctorado de 2 años en el Centro de Investigaciones en Óptica, unidad Aguascalientes. Actualmente se desempeña como profesor en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la UNACH. Sus líneas de investigación están centradas en el desarrollo de sensores de fibra óptica, integrando materiales bidimensionales, como el grafeno.



Víctor Iván Ruiz Pérez, es doctor en Ciencias con especialidad en Óptica, egresado del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2011. Ha sido investigador del SECIHTI a través del programa de Cátedras, hoy Investigadores por México. Actualmente es profesor-investigador de la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras Nivel 1.



Gilbert Francis Pérez García, egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, donde obtuvo la Licenciatura en Electrónica y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, además de contar con una Maestría en Optomecatrónica por el Centro de Investigaciones en Óptica. Su formación académica ha estado enfocada en el desarrollo de sensores de fibra óptica aplicados al estudio de la calidad



del agua. A lo largo de su trayectoria ha trabajado en sistemas optomecatrónicos, visión artificial y aplicación de redes neuronales enfocados a la industria. Actualmente desarrolla un posdoctorado en la UNACH orientado al diseño de sensores de fibra óptica inteligentes, incorporando algoritmos de inteligencia artificial para optimizar el monitoreo y evaluación de la calidad del agua.



Ariel Flores Rosas, es doctor en ciencias ópticas por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Las contribuciones más importantes de su carrera científica son: Es miembro activo de la revista Optical Engineering como árbitro, miembro activo de la AMO (Academia Mexicana de Óptica, A. C.), ha participado como evaluador del programa de Verano de la Investigación Científica (Academia Mexicana de Ciencias, A.C.), miembro del registro Conahcyt de evaluadores acreditados (RCEA), miembro del Sistema Estatal de Investigadores Nivel VI (Cocytech). Actualmente es investigador en el departamento de Óptica de la FCFM de la UNACH. Su línea de Investigación es en el campo de la óptica.



Luis Escalante Zárate, es ingeniero en mecatrónica egresado del Instituto Politécnico Nacional. También es maestro y doctor en ciencias ópticas, egresado del Centro de Investigaciones en Óptica en la ciudad de León, Guanajuato. El doctor ha realizado trabajos de investigación sobre el tema de láseres de fibra óptica de salida continua y pulsada. Y en la industria el Dr. Escalante ha participado en el diseño de medidores de niveles de líquidos. Actualmente es profesor en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la UNACH.

Tecnología de microondas rápida, sencilla y eficiente: fundamentos y aplicaciones en la despolimerización de la lignina.

Rapid, simple, and efficient microwave technology: fundamentals and applications in lignin depolymerization.

Karen López Camas* (1).

Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta,
Edmonton, Alberta, Canada T6G 2P5.

Klopezca@ualberta.ca.

Aman Ullah (2). Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta,
Edmonton, Alberta, Canada T6G 2P5. Ullah2@ualberta.ca.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2025; aceptado en octubre 09, 2025.

Resumen.

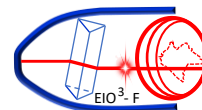
El presente proyecto pretende dar un panorama acerca del uso del microondas como fuente de calentamiento en reacciones químicas, en particular, su uso en la despolimerización de la lignina para poder obtener moléculas de masa molecular y polidispersidad reducida comparadas con la lignina sin modificar. Las técnicas convencionales de despolimerización de la lignina requieren condiciones severas y un alto consumo energético, lo que impulsa la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este trabajo se evaluó la despolimerización de lignina Kraft asistida por microondas mediante isopropanol y ácido fórmico como medios de reacción. El calentamiento por microondas permite una transferencia directa de energía al material mediante la interacción con los dipolos moleculares, lo que aumenta la eficiencia térmica y reduce significativamente los tiempos de reacción.

Palabras claves: Despolimerización, lignina, microondas.

Abstract.

This project aims to provide an overview of the use of microwaves as a heating source in chemical reactions, particularly their use in lignin depolymerization to obtain molecules with reduced molecular weight and polydispersity compared to unmodified lignin. Conventional lignin depolymerization techniques require harsh conditions and high energy consumption, prompting the search for more sustainable alternatives. This work evaluated microwave-assisted depolymerization of Kraft lignin using isopropanol and formic acid as the reaction media. Microwave heating allows direct energy transfer to the material through interaction with molecular dipoles, resulting in greater thermal efficiency and significantly reduced reaction times.

Keywords: Depolymerization, lignin, microwaves.



1. Descripción de la conferencia.

Durante las últimas décadas el uso de radiación de microondas como método de calentamiento en reacciones químicas se ha popularizado debido a su calentamiento de alta eficacia comparada con métodos de calentamiento convencionales. Una de las grandes ventajas y lo cual ha popularizado ampliamente el uso del microondas tanto en academia como en la industria es la drástica reducción de tiempos de reacción, de reacciones que podrían tomar días o horas son reducidas a minutos y segundos (Kappe & Dallinger, 2006). A diferencia de métodos convencionales de calentamiento, con el microondas se pueden calentar sustancia mediante transferencia de energía por lo que las radiaciones electromagnéticas se convierten a energía calorífica (Agarwal et al., 2021). La radiación de microondas es una forma de radiación electromagnética porque contiene componentes de campo eléctrico y magnético. El rango de frecuencias del microondas se encuentra entre 300 MHz y 300 GHz, con longitudes de onda que van desde 1 mm a 1 m. Los hornos de microondas domésticos suelen operar a una frecuencia de 2.45 GHz. En el espectro electromagnético, las microondas se sitúan entre las frecuencias del infrarrojo y del radio, como se aprecia en la **Fig. 1**.

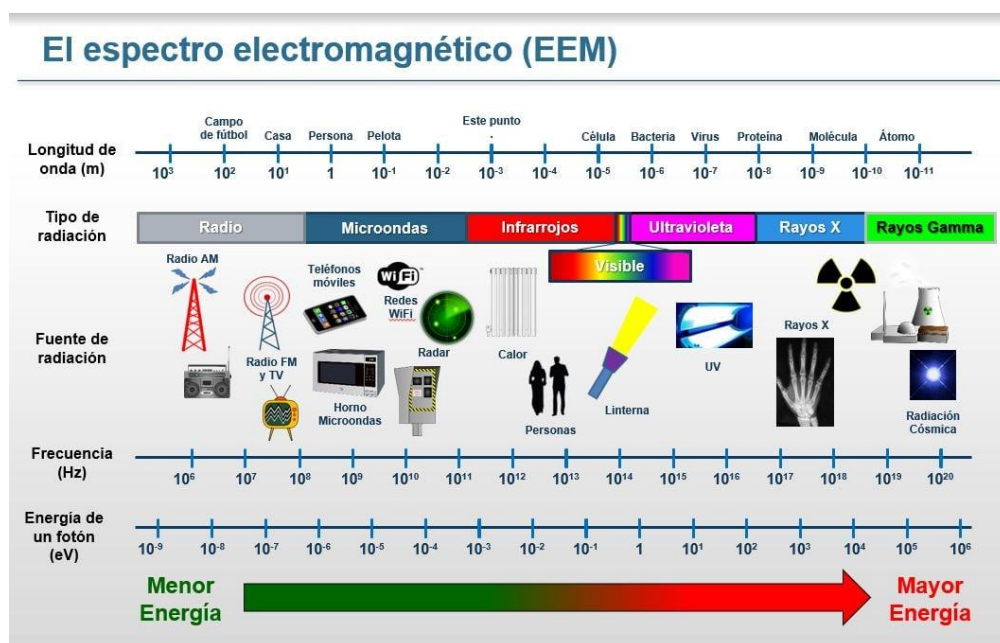
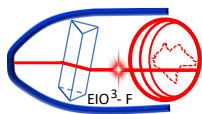


Figura 1. Ubicación del horno de microondas en el espectro electromagnético. Figura tomada de (Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud (CCARS), 2025).

La materia puede interactuar con las microondas de tres maneras distintas, se acuerdo a esto los materiales se pueden clasificar en transparentes, reflectantes y dieléctricos (**Fig. 2**). En el caso de los materiales transparentes como por ejemplo el cuarzo, las microondas penetran el material sin ninguna pérdida de energía, estos materiales se conocen como materiales transparentes a las microondas ya que permiten el paso de la radiación, su estructura molecular no absorbe ni refleja significativamente las microondas. Los materiales reflectantes como los metales no absorben la radiación de microondas, al contrario, las reflejan en la superficie. Por último los materiales dieléctricos, estos absorben las microondas, por ejemplo el agua y metanol (Lopez Camas & Ullah, 2022). Los materiales dieléctricos son aquellos que pueden polarizarse al aplicar un campo eléctrico. Estos materiales son capaces de absorber y convertir las microondas en calor (convierten energía electromagnética en energía térmica). En un horno de microondas, ondas electromagnéticas son generadas por un emisor (como el magnetrón) y se transmiten a través del espacio hacia el material en exposición lo cual genera un campo electromagnético alterno y esto a su vez provoca rotación molecular, colisión, torsión, y/o fricción dentro de la estructura molecular del material expuesto mediante interacciones rápidas entre las microondas y la muestra (Asomaning et al., 2018).



Los dos mecanismos por los cuales la radiación de microondas induce el calentamiento de las muestras o materiales expuestos son la polarización dipolar y la conducción iónica. Cuando una muestra es irradiada con microondas, los dipolos y los iones presentes en ella intentarán alinearse con el campo eléctrico alternante. En este proceso de continuo movimiento de reorientación y desplazamiento se genera fricción molecular y pérdidas dieléctricas provocando que la energía electromagnética se disipe en forma de calor dentro del material (Kappe & Dallinger, 2006).

La reorientación dipolar entre moléculas polares la fuerza del campo eléctrico cause que los electrones π y núcleo atómico sean desplazados de su posición de equilibrio, por lo tanto, induciendo dipolos. Las cargas positivas en el material se desplazan en la dirección del campo eléctrico, y las cargas negativas, en la dirección opuesta.

Para comprender el mecanismo mediante el cual las microondas inducen el calentamiento de una sustancia, es necesario entender los factores que determinan su interacción con el campo electromagnético, tales como sus propiedades dieléctricas, la polaridad molecular y la conductividad eléctrica del medio. Cada material posee un conjunto característico de propiedades dieléctricas, que influyen directamente en su capacidad de absorber y transformar la energía electromagnética en calor durante la exposición a microondas. Las principales propiedades dieléctricas son la constante dieléctrica (ϵ'), la pérdida dieléctrica (ϵ''), y la tangente de pérdidas ($\tan \delta$). El término constante dieléctrica se refiere a la capacidad de un material para polarizarse bajo la acción de un campo eléctrico externo y se expresa generalmente en relación con la permitividad al vacío. La propiedad dieléctrica más importante es la tangente de pérdidas ($\tan \delta$). Esta propiedad representa la capacidad de una sustancia para convertir la energía electromagnética en calor. Estas tres propiedades, juntas, están relacionadas con la capacidad de la muestra para absorber la energía de microondas. Estas propiedades son importantes al diseñar un experimento con microondas, por ejemplo, al elegir disolventes que favorezcan el calentamiento de la reacción. Los disolventes pueden clasificarse en tres grupos: de alta, media y baja absorción. Los de alta absorción son los que tienen valores de pérdidas dieléctricas por encima de 14, como, por ejemplo, etilenglicol, ácido fórmico, etanol, metanol, nitrobenzeno, 1-propanol e isopropanol. Estos disolventes pueden alcanzar temperaturas por encima de su ebullición de manera bastante eficaz y rápida. Los de media absorción tienen valores de pérdidas dieléctricas entre 1 y 13.99, entre ellos están el agua, isobutanol, acetona y ácido acético entre otros. Y finalmente los de baja absorción con valores de pérdidas dieléctricas menores a 1, estos disolventes pueden ser calentados con microondas, pero requieren de bastante tiempo para alcanzar temperaturas arriba de sus puntos de ebullición. Ejemplos de disolventes de baja absorción son tetrahidrofurano, tolueno, hexano (CEM, 2025).

Una característica de las reacciones asistidas por microondas es que los puntos de ebullición de los solventes dejan de ser un factor decisivo en la elección del parámetro de temperatura a utilizar. La energía de un microondas de 300 W va a sobrepasar el punto de ebullición de muchos solventes en cuestión de segundos, por esto los hornos para reacciones de laboratorio han sido diseñados con recipientes que pueden ser cerrados y presurizados (CEM, 2025). Por ejemplo, calentar etanol (punto de ebullición de 78 °C) en el microondas usando un recipiente cerrado a presión puede llegar a alcanzar una temperatura de 160 °C en 3 minutos, mientras que cuando se calienta en baño de aceite sin sistema de presurización a una temperatura ajustada de 100 °C, el solvente solo logra alcanzar aproximadamente 80 °C en 3 minutos y ahí se mantiene por el resto de la reacción (Kappe & Dallinger, 2006).

Generalmente, las reacciones se han llevado a cabo utilizando fuentes externas de calentamiento, tales como baños de aceite y de arena. En estos sistemas, el calor se transfiere por conducción, lo que implica un tiempo adicional prolongado previo a la reacción para alcanzar la temperatura deseada. Este método de transferencia de energía térmica depende de la conductividad térmica de los materiales, lo que limita la penetración uniforme del calor y provoca que la temperatura del recipiente sea mayor que la de la mezcla de reacción. En contraste, el calentamiento por microondas produce calentamiento interno eficiente, resultado de un acoplamiento directo de la energía de microondas con las moléculas polares que sean parte de la mezcla de reacción (Kappe & Dallinger, 2006).

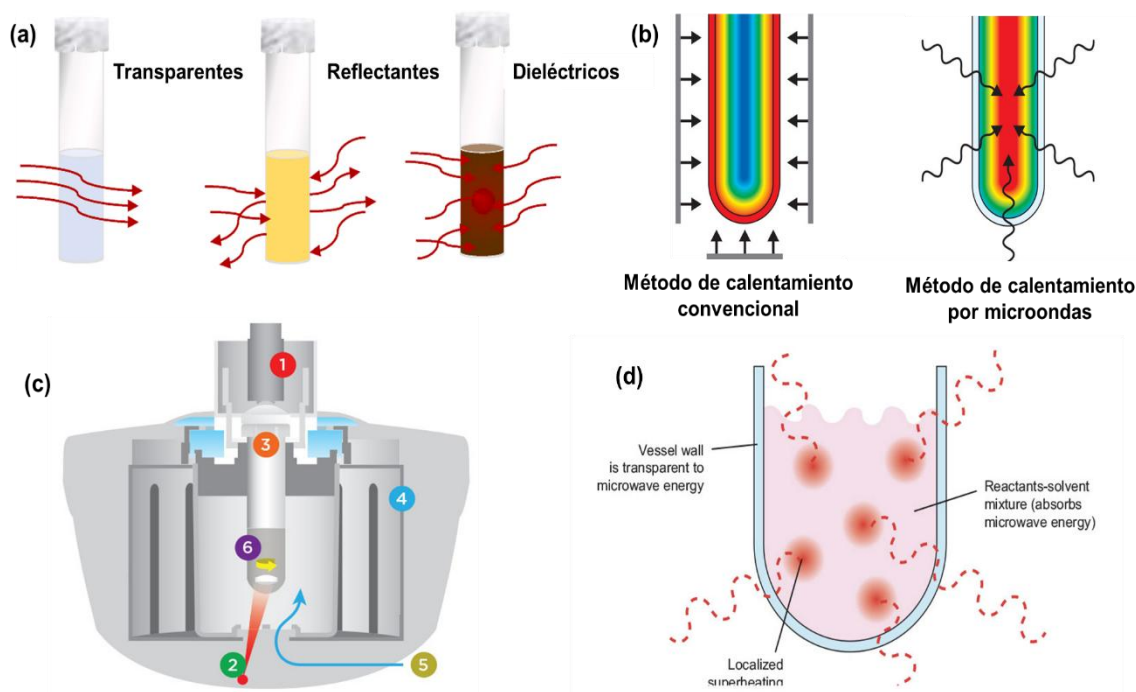
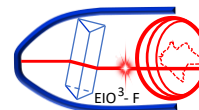
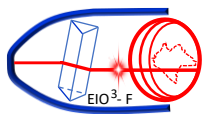


Figura 2. (a) Interacción de la radiación de microondas con diferentes tipos de materiales: los transparentes (no absorben la radiación), los reflectantes (metales que la reflejan) y los dieléctricos (que la absorben y se calientan internamente). (b) Comparación entre el calentamiento convencional por conducción, en el que el calor se transfiere desde la pared del recipiente hacia el interior, y el calentamiento por microondas, en el que la energía penetra directamente en el volumen de la muestra, generando calentamiento volumétrico. (c) Esquema simplificado de un reactor de microondas sellado, en el que la energía se dirige al vaso de reacción y la temperatura y la presión se controlan con precisión. (d) Representación del calentamiento selectivo, en el que la mezcla reactivo-disolvente absorbe la radiación de microondas, provocando sobrecalentamientos localizados mientras la pared del recipiente permanece transparente a la energía.

Por otro lado, el crecimiento poblacional y los cambios en los estilos de vida han impulsado la urbanización, la industrialización y un mayor consumo de energía y de materiales. Esta tendencia genera una creciente demanda de compuestos químicos y de recursos, lo que plantea el reto de desarrollar alternativas más sostenibles. Actualmente, un gran porcentaje de los compuestos químicos se obtienen a partir de fuentes fósiles. Sin embargo, este recurso es finito y su uso ha mostrado durante todos estos años muchos efectos negativos en el ambiente, contaminando el agua, el aire y liberando gases de invernadero en la atmósfera como CO_2 (Lopez Camas et al., 2025). Una de las fuentes renovables, biodegradables y amigables con el medio ambiente es la lignina. La lignina forma parte del material lignocelulósico, que está constituido por celulosa, hemicelulosa y lignina. Durante décadas, la celulosa se ha aprovechado comercialmente para producir bioetanol y papel, mientras que la lignina se ha considerado un subproducto residual con una estructura química alterada. A nivel global, se generan alrededor de 150 mil millones de toneladas de lignina al año, de las cuales la industria papelera de EE. UU. produce más de 50 millones de toneladas (Farg et al., 2014; Khan et al., 2022). Sin embargo, cerca del 95 % de la lignina industrial se quema para su recuperación energética o se desecha, y solo una pequeña fracción se destina a la síntesis de productos químicos como dispersantes, surfactantes, floculantes, adsorbentes y adhesivos. En el marco de una economía circular, las biorrefinerías buscan integrar la lignina en el aprovechamiento integral de la biomasa. Empresas como Borregaard y LignoTech ya desarrollan aplicaciones basadas en lignina, incluyendo aglutinantes, estabilizantes de emulsión y agentes complejantes, lo que refleja su creciente potencial industrial (Bajwa et al., 2019; Wang et al., 2023).



Químicamente, la lignina es un polímero fenólico formado por tres principales monómeros fenilpropanoides, conocidos como monolignoles, p-cumarílico, conerílico y sinapílico que a su vez iniciarán las unidades que formarán la lignina p-hidroxifenílico, guayacilo y siringilo, respetivamente.

La aplicación de la tecnología del microondas en la conversión de lignina se ha dividido en dos categorías (Yunpu et al., 2016):

1. **Pirólisis de lignina asistida por microondas.** Esta clasificación se refiere a la reacción de pirólisis que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno a altas temperaturas; estas reacciones pueden llevarse a cabo con o sin catalizador.
2. **Solvólisis de lignina asistida por microondas.** En esta clasificación se incluyen las reacciones de solvolisis; este tipo de reacciones requiere temperaturas de reacción relativamente bajas. Entre las ventajas de la solvolisis en microondas se encuentra un incremento de la eficiencia y la selectividad de la despolimerización.

La despolimerización de lignina es un proceso que tradicionalmente requiere altas temperaturas y largos tiempos de reacción, lo que lo convierte en una operación altamente intensiva en energía, de baja eficiencia y de limitada viabilidad económica. Este desafío se acentúa debido a la naturaleza compleja y altamente reticulada de la lignina, lo que dificulta la obtención de fracciones uniformes y reproducibles.

Ante ello, nuestro trabajo busca desarrollar una tecnología ambientalmente sostenible, escalable y de bajo consumo energético, capaz de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero frente a los métodos térmicos convencionales. Basándonos en estudios recientes que reportan un efecto sinérgico entre disolventes donadores de hidrógeno e irradiación por microondas, exploramos la viabilidad de la despolimerización de lignina Kraft asistida por microondas, empleando isopropanol y ácido fórmico como medios de reacción y sin necesidad de catalizadores metálicos. Esta aproximación aprovecha el calentamiento dieléctrico selectivo de las microondas, que permite una transferencia de energía más eficiente, una ruptura más controlada de enlaces β -O-4 y la obtención de lignina despolimerizada con menor masa molecular bajo condiciones leves de reacción

2. Métodos.

La metodología se basa en el trabajo reportado previamente (Lopez Camas et al., 2025). La reacción de despolimerización de lignina kraft se llevó a cabo en un reactor de microondas CEM-Discover (120 V, Matthews, EE. UU.), como se muestra en la **Fig. 3**. Un recipiente de reacción de microondas de capacidad de 10 mL, con una barra magnética de agitación, se llenó con la cantidad deseada de lignina kraft (0.5 g), 4 mL de isopropanol y 1.5 mL de ácido fórmico.

El recipiente se cerró y se colocó en el reactor de microondas, ajustando una presión máxima de 250 psi y una potencia máxima de 250 W. Mientras se mantenía la agitación continua, la mezcla de reacción se calentó hasta la temperatura deseada (100–200 °C) y se mantuvo durante el tiempo de reacción deseado. El inicio de cada reacción se consideró desde el momento en que alcanzó la temperatura deseada. En la **Fig. 3** se muestra el reactor de microondas usado para la reacción y los recipientes disponibles para este reactor, que son de capacidad de 10 mL y 80 mL, los cuales fueron utilizados cuando se requería mayor cantidad de lignina despolimerizada. Al completar la reacción, el producto obtenido presenta una fase líquida y otra sólida. Estas se separaron mediante filtración con papel de filtro pesado previamente.

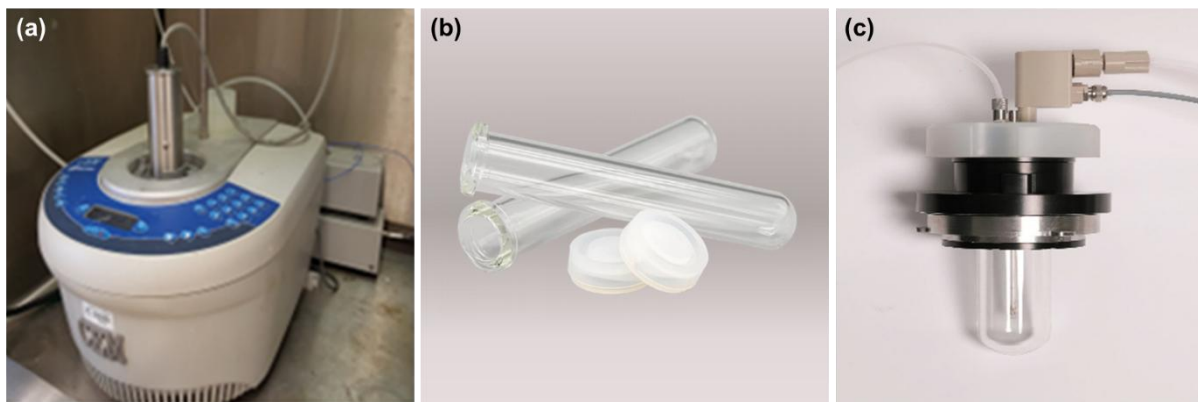


Figura 3. Reactor de microondas CEM-Discover (a), recipiente de reacción especial para microondas con capacidad de 10 mL (b), y recipiente de reacción en microondas con capacidad de 80 mL empleado para reacciones de mayor escala.

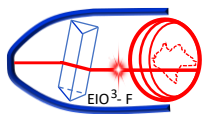
Las muestras se analizaron mediante cromatografía de permeación en gel (GPC) para determinar el promedio de masa molecular en número (M_n) y el promedio de masa molecular en peso (M_w). Para el análisis las muestras, primero se disolvieron en tetrahidrofurano y se filtraron a través de un filtro de jeringa de PTFE, los análisis se llevaron a cabo en un instrumento de cromatografía de permeación en gel equipado con una bomba y un muestreador automático (Agilent serie 1200), detector de dispersión de luz evaporativa (ELSD) y una columna Phenogel™ 5μm 500 Å. El tetrahidrofurano se usó como eluyente con un flujo de 0,5 mL/min, y la calibración se realizó con estándares de poliestireno.

3. Desarrollo.

El uso del microondas nos permitió despolimerizar la lignina en fragmentos más pequeños que los de la lignina inicial. Las reacciones de despolimerización requieren altas temperaturas y tiempos de reacción bastante largos, de aproximadamente 4 a 24 h, o incluso más, lo que hace que los procesos de despolimerización sean de alto consumo energético y, por lo general, no sean considerados viables económicamente. Esta investigación se basó en el uso del microondas como fuente de calentamiento para romper los enlaces químicos que mantienen la compleja unidad polimérica de la lignina y, con ello, reducir su masa molecular.

Previamente, en nuestro grupo se evaluó el consumo energético del calentamiento en microondas frente a los métodos convencionales. Los resultados demostraron que el uso de microondas es mucho más eficiente en términos de consumo de energía. En particular, la comparación con el método de baño de arena, que requirió **31.857 kWh mol⁻¹**, mientras que el proceso asistido por microondas requirió únicamente **1.417 kWh mol⁻¹**. Otra diferencia importante fue que para llevar a cabo la reacción manteniendo los mismos parámetros, el baño de arena requirió de **1819 min** mientras que en el microondas tomó solamente **54 min**, este tiempo incluye el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada y el tiempo de reacción a la temperatura específica de la reacción (Herrero & Ullah, 2021).

Se evaluaron distintos disolventes con el objetivo de seleccionar el que favoreciera rendimientos más altos y promoviera una despolimerización eficiente de la lignina hacia fracciones de menor masa molecular. Entre ellos, el ácido fórmico y el isopropanol mostraron valores de pérdida dieléctrica superiores a 14 (**Tabla 1**), lo que los clasifica como disolventes de alta absorción de microondas capaces de convertir la energía electromagnética en calor de manera eficiente. Para comparar el efecto del calentamiento convencional, se utilizó un baño de aceite en el mismo tipo de recipiente que se empleó en las reacciones por microondas. Sin embargo, este sistema no permitió mantener la presión interna generada durante el calentamiento, lo que provocó la liberación de vapor y la pérdida parcial del solvente, imposibilitando la reproducción de condiciones controladas. Posteriormente, se utilizó un matraz de fondo redondo de



dos bocas, equipado con un condensador y un termómetro, para minimizar la pérdida de solvente. La temperatura de reacción se limitó a 80 °C, en el cual se mantuvo estable el volumen de la mezcla. Las temperaturas más altas provocaron la evaporación parcial de los disolventes, alterando su proporción y, por tanto, las condiciones de reacción. Los análisis de GPC se realizaron a los **30 min** iniciales y luego cada hora, hasta alcanzar masas moleculares similares a las obtenidas con 30 min de tratamiento por microondas a la misma temperatura. Como se muestra en la **Fig. 4**. Fue necesario prolongar la reacción hasta **5 h** bajo calentamiento convencional, lo que confirma la mayor eficiencia del calentamiento por microondas. Usando microondas como método de calentamiento incluso observamos que con solo 15 min de reacción la masa molecular redujo significativa de la masa molecular inicial de la lignina Kraft (**Mn:2923.8 g/mol y Mw:10177 g/mol**) a el producto de lignina despolimerizada.

Tabla 1. Parámetros dieléctricos y puntos de ebullición de los disolventes seleccionados.

Disolvente	Punto de ebullición (°C)	Constante dieléctrica (ϵ')	Tan δ	Perdida dieléctrica (ϵ'')
Ácido fórmico	100	58.5	0.722	42.237
Isopropanol	82.3	18.3	0.799	14.622

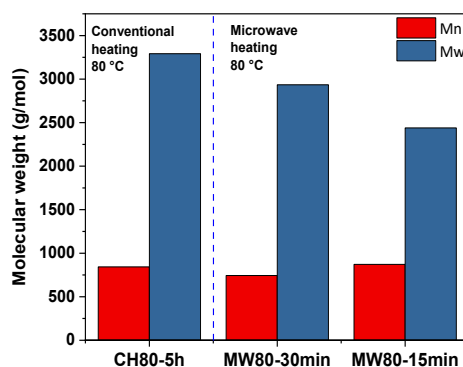


Figura 4. Masa molecular promedio numérica, Mn, y promedio en peso, Mw de la despolimerización de la lignina usando métodos convencionales de calentamiento (CH) y microondas (MW) a 80 °C.

Uno de los parámetros evaluados fue el efecto de la temperatura en el proceso de despolimerización, las temperaturas evaluadas fueron en el rango de 100 a 200 °C manteniendo constante un tiempo de reacción de 30 minutos, 0.5 g de lignina y 5.5 mL solvente en un recipiente especial de microondas con capacidad de 10 mL. La **Fig. 5** ilustra la relación entre la temperatura y la masa molecular de la lignina despolimerizada. Nuestros resultados indican que la temperatura desempeña un papel crucial en la ruptura de la estructura de la lignina. El rendimiento aumentó a medida que la temperatura pasó de 100 a 120 °C, alcanzando un valor máximo del 55,3 %. Sin embargo, al continuar aumentando la temperatura, el rendimiento disminuyó. A pesar de que a 140 °C se obtuvo un rendimiento ligeramente menor de lignina despolimerizada (bio-oil, 47,6 %), la masa molecular fue inferior a la obtenida a 120 °C.

Entre 120 °C y 200 °C, los residuos sólidos aumentaron del 46,41 % al 69,25 %. Este comportamiento puede atribuirse a que, al incrementar la temperatura, los fragmentos intermedios, como radicales fenólicos o fragmentos aromáticos parcialmente hidrogenados, tienden a ser altamente reactivos e inestables. En ausencia de suficiente hidrógeno disponible en el medio (ya sea por consumo del ácido fórmico o por limitación de transferencia), dichos radicales pueden recombinarse entre sí o con otros compuestos aromáticos, promoviendo la formación de enlaces -C-C y -C-O-C, lo cual resulta en nuevas estructuras condensadas que se vuelven los residuos sólidos al final de las reacciones (Toledano et al., 2013).

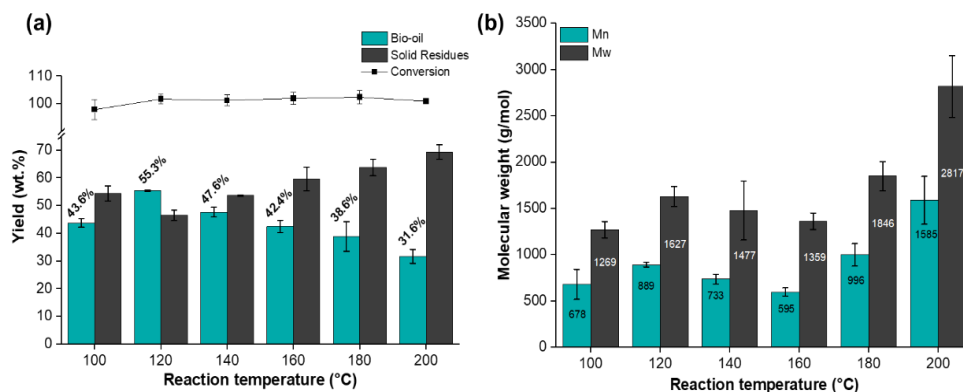
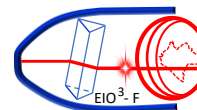


Figura 5. Efecto de la temperatura de reacción en el (a) rendimiento de la lignina despolimerizada y (b) en la masa molecular promedio numérica, Mn, y promedio en peso, Mw. Figura obtenida de (Lopez Camas et al., 2025)

Los resultados de la masa molecular a distintas temperaturas se muestran en la **Fig. 5b**. Temperaturas de 180 y 200 °C resultaron en un incremento de los valores de Mn y Mw, lo que indica, una vez más, que las temperaturas altas en el microondas no favorecieron la despolimerización de la lignina. Bajo radiación de microondas, el ácido fórmico no solo actúa como donante de hidrógeno, sino que también participa en una secuencia de formylation-elimination-hydrogenolysis que favorece la ruptura de los enlaces β -O-4 de la lignina. La energía dieléctrica acelera la transferencia de energía a los dipolos reactivos, mejorando la eficiencia del proceso frente al calentamiento convencional (Rahimi et al., 2014a; Zhou et al., 2022).

Conclusiones.

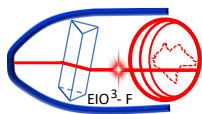
El uso de microondas en la despolimerización de lignina ofrece un método rápido, eficiente y sostenible para romper enlaces en condiciones más leves. Su capacidad de calentar selectivamente los componentes polares del sistema mejora la conversión a compuestos de menor peso molecular y reduce el consumo energético, lo que lo convierte en una alternativa prometedora frente a los métodos térmicos convencionales.

Créditos.

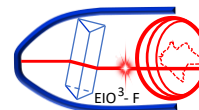
El autor agradece a la Universidad de Alberta (Canadá) por el apoyo académico y las facilidades brindadas para la realización de esta investigación, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT, México) por el financiamiento otorgado a través de su programa de becas de posgrado.

Referencias bibliográficas.

- Agarwal, A., Jo, Y. T., & Park, J. H. (2021). *Hybrid microwave-ultrasound assisted catalyst-free depolymerization of Kraft lignin to bio-oil*. Industrial Crops and Products, 162(January), 113300. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113300>
- Asomaning, J., Haupt, S., Chae, M., & Bressler, D. C. (2018). *Recent developments in microwave-assisted thermal conversion of biomass for fuels and chemicals*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 92(April 2017), 642–657. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.084>



- Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., & Bajwa, S. G. (2019).** *A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact.* Industrial Crops and Products, 139, 111526. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111526>
- CEM. (2025).** *Solvent Choice for Microwave Synthesis.* https://cem.com/microwave-chemistry/solvent-choice?__store=en&__from_store=cn
- Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud (CCARS). (2025).** *Qué radiaciones componen el espectro electromagnético, cuáles y cómo afectan a la salud y por qué no debemos tenerles miedo.* CCARS. <https://ccars.org.es/noticias-home/maldita-radiofrecuencia-noticias-lateral/280-que-radiaciones-componen-el-espectro-electromagnetico-cuales-y-como-afectan-a-la-salud-y-por-que-no-debemos-tenerles-miedo>
- Farag, S., Fu, D., Jessop, P. G., & Chaouki, J. (2014).** *Detailed compositional analysis and structural investigation of a bio-oil from microwave pyrolysis of kraft lignin.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 109, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.06.005>
- Herrero, Y. R., & Ullah, A. (2021).** *Rapid, Metal-Free, Catalytic Conversion of Glycerol to Allyl Monomers and Polymers.* ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(28), 9474–9485. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C03134>
- Kappe, C. O., & Dallinger, D. (2006).** *The impact of microwave synthesis on drug discovery.* Nature Reviews Drug Discovery, 5(1), 51–63. <https://doi.org/10.1038/nrd1926>
- Khan, R. J., Lau, C. Y., Guan, J., Lam, C. H., Zhao, J., Ji, Y., Wang, H., Xu, J., Lee, D. J., & Leu, S. Y. (2022).** *Recent advances of lignin valorization techniques toward sustainable aromatics and potential benchmarks to fossil refinery products.* Bioresource Technology, 346(August 2021), 126419. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126419>
- Lopez Camas, K., Ahvazi, B., & Ullah, A. (2025).** *Efficient and rapid depolymerization of Kraft lignin to bio-oil using microwave heating with solvent sequential extraction.* Industrial Crops & Products, 226, 120700. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120700>
- Lopez Camas, K., & Ullah, A. (2022).** *Depolymerization of lignin into high-value products.* Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 40, 102306. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102306>
- Riaz, A., Kim, C. S., Kim, Y., & Kim, J. (2016).** *High-yield and high-calorific bio-oil production from concentrated sulfuric acid hydrolysis lignin in supercritical ethanol.* Fuel, 172, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.12.051>
- Wang, T., Li, H., Diao, X., Lu, X., Ma, D., & Ji, N. (2023).** *Lignin to dispersants, adsorbents, flocculants and adhesives: A critical review on industrial applications of lignin.* Industrial Crops and Products, 199(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116715>
- Yunpu, W., Leilei, D., Liangliang, F., Shaoqi, S., Yuhuan, L., & Roger, R. (2016).** *Review of microwave-assisted lignin conversion for renewable fuels and chemicals.* In Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.03.011>



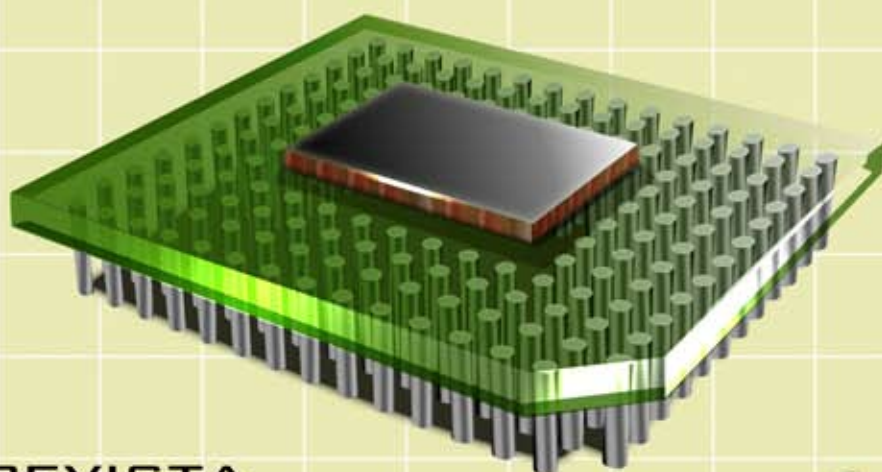
Biografías de los investigadores.



Karen López Camas es Doctora en Ciencias egresada de la Universidad de Alberta (Canadá), en el Departamento de Ciencias Agrícolas, Alimentarias y Nutricionales (Agricultural, Food and Nutritional Science), con especialización en Bioresource Technology. Actualmente se encuentra realizando un postdoctorado en el grupo de investigación del Dr. Aman Ullah en la Universidad de Alberta, continuando con proyectos de investigación sobre el aprovechamiento de la lignina para la fabricación de productos de valor agregado.



Aman Ullah Holds a Ph.D. in Chemical Sciences and Technologies from the University of Genova (Italy), where he also conducted part of his doctoral research at Southern Methodist University (United States). He is a Full Professor in the Department of Agricultural, Food and Nutritional Science at the University of Alberta (Canada). He is also the Associate Dean (Academic) in the Faculty of Agricultural, Life and Environmental Sciences. He leads the Lipid/Materials Chemistry Research Group (LMCG), specializing in the chemical conversions of biomass and synthesis of biopolymers, biochemicals, biocomposites, and bionanocomposites from lipids and other renewable resources for various industrial applications. He has received distinctions such as the Canadian Rising Star Award, the ALES Research and Innovation Award, and the ASTech Award (2022).



REVISTA
TECNOLOGÍA
DIGITAL

www.revistatecnologiadigital.com