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 vert5icales 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 señores 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 pude sufrir una estructura civil si en dado caso no cuenta con un sistema de monitoreo y de prevención. Cada uno de estos tipos de deteriores 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 relacionan 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

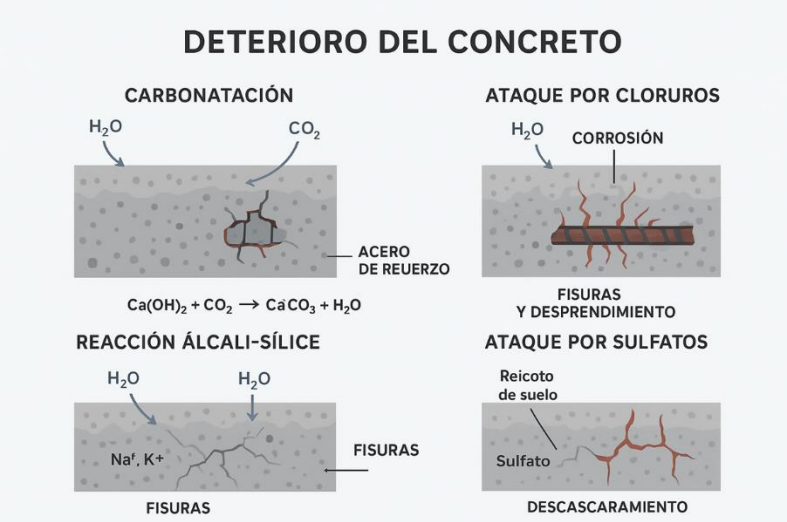


Figura 1. Diferentes mecanismos que se encuentran involucrados en el deterioro del concreto.

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 involucran 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.

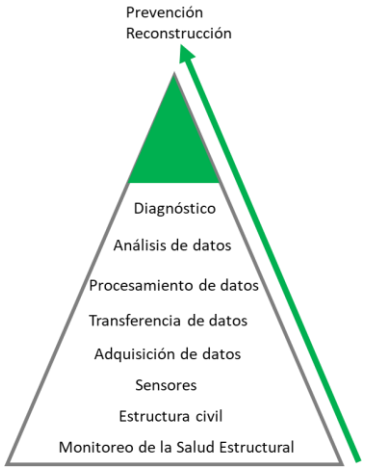


Figura 2. Procedimiento para llevar a cabo un sistema de monitoreo de la salud estructural.

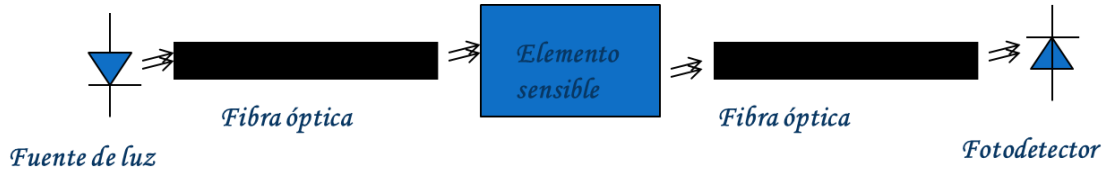
4. Sensores de fibra óptica.

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.

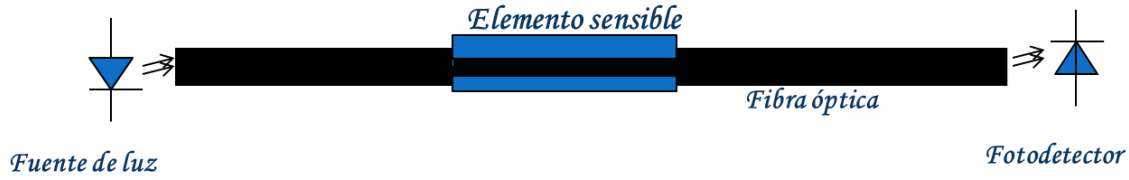
Los sensores de fibra óptica pueden detectar variaciones en diferentes parámetros de la luz, tales como:
a) Intensidad: Cambios en la potencia óptica transmitida o reflejada, proporcionales al estímulo externo.
b) Fase: Modificaciones en la diferencia de fase entre dos haces de luz, comúnmente aprovechadas 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 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.



a) Extrínseco



b) 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 una 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 Rejilla 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 especificas 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 e 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 unción 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 enIngeniería 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.