



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**Evaluación del efecto de la intensidad de radiación fotosintéticamente activa
absorbida por un cultivo de microalgas.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Sistemas Ambientales

Presenta:

Ing. Alejandro Daniel Hernández Ramírez

Directora de tesis:

Dra. Yolocuauhtli Salazar Muñoz

Codirector

Dr. Paul Antonio Valle Trujillo

Durango, Dgo. México

abril 2026





Evaluación del efecto de la intensidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por un cultivo de microalgas.

Presenta:

Alejandro Daniel Hernández Ramírez
COMITÉ TUTORIAL

Dra. Yolocauhtli Salazar Muñoz	
Directora	Firma
Dr. Paul Antonio Valle Trujillo	
Codirector	Firma
Dr. Sergio Valle Cervantes	
Asesor	Firma
Dr. Alfredo de Jesús Martínez Roldán	
Asesor	Firma
MI. María Dolores Josefina Rodríguez Rosales	
Asesor	Firma

C. Tania Montoya García
Coordinadora de la Maestría en
Sistemas Ambientales

C. Tania Montoya García
Jefa de la División de Estudios de
Posgrado e Investigación

Durango, Dgo. México

abril 2026





	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO		Código: ITD-DEPI-SIAC-01
			Revisión: 0
	Nombre del documento: CONSTANCIA DE CUMPLIMIENTO DE CRITERIOS ORIGINALIDAD DEL DOCUMENTO DE TESIS		Página 1 de 2
	Sin Referencias		Fecha de emisión: 30 DE SEPTIEMBRE DE 2021

Durango, Dgo., a 23 de abril de 2026

C. Tania Montoya García
Coordinadora del Programa de la
Maestría en Sistemas Ambientales

Presente

Por medio del presente, se hace constar que la tesis denominada **“Evaluación del efecto de la intensidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por un cultivo de microalgas”** del (la) **C. Alejandro Daniel Hernández Ramírez**, con número de control **17041685**, estudiante (a) de la **Maestría en Sistemas Ambientales**, se sometió al software anti plagio para ser examinado, en donde el reporte técnico del software mostró un porcentaje de **4%** de similitud general.

En base al reporte se considera que **CUMPLE** con los criterios de originalidad, por lo que se emite el siguiente dictamen: **SE AUTORIZA DAR INICIO A LOS TRÁMITES DE OBTENCIÓN DEL GRADO.**

COMITÉ TUTORIAL

Dra. Yolanda Salazar Muñoz

Nombre y firma Vo. Bo.
Director de tesis responsable

Dr. Sergio Valle Cervantes

Nombre y firma Vo. Bo.

Asesor

Mtra. María Dolores
Josefina Rodríguez Rosales

Nombre y firma Vo. Bo.

Asesor

Dr. Paul Antonio Valle Trujillo

Nombre y firma Vo. Bo.
Coadirector de tesis

Dr. Alfredo de Jesús Martínez Roldán

Nombre y firma Vo. Bo.

Asesor

c.c.p.

Estudiante

Coordinación del programa

ITD-DEPI-SIAC-01

Revisión 0



4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 2% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a 02 / Junio / 2026.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 213 / 2026.

Asunto: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. ALEJANDRO DANIEL HERNANDEZ RAMIREZ
No. DE CONTROL G17041685
P R E S E N T E .

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Sistema Ambientales** cuyo título es:

"Evaluación del efecto de la intensidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por un cultivo de microalgas"

CONTENIDO:

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

Lo anterior con la finalidad de que se le dé el seguimiento correspondiente.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. TANIA MONTOYA GARCÍA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TMG/ammc.



2026
año de
Margarita
Maza



Bvd. Felipe Pescador No. 1830 Ote., Durango, Dgo., C.P. 34080

e-mail: deposgrado@itdurango.edu.mx

tecnm.mx | itdurango.edu.mx



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Durango
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **02 / Junio / 2026**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 214 / 2026.

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. ALEJANDRO DANIEL HERNANDEZ RAMIREZ
No. DE CONTROL G17041685
P R E S E N T E .

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Sistemas Ambientales**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

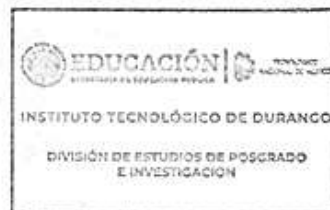
"Evaluación del efecto de la intensidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por un cultivo de microalgas"

Sin más otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. TANIA MONTOYA GARCÍA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



TMG'ammc.



2026
año de
Margarita
Maza



Blvd. Felipe Pescador No. 1830 Ote., Durango, Dgo., C.P. 34080

e-mail: deposgrado@itdurango.edu.mx

tecnm.mx | itdurango.edu.mx





LICENCIA DE USO OTORGADA POR **ALEJANDRO DANIEL HERNÁNDEZ RAMÍREZ**, de nacionalidad mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en **Pablo Gómez #335, Colonia IV Centenario, C.P. 34150, Durango, Durango, México**, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA ABSORBIDA POR UN CULTIVO DE MICROALGAS"**, en adelante **"LA OBRA"**, quien para todos los fines del presente documento se denominará **"EL AUTOR Y/O EL TITULAR"**, a favor del Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, y con fundamento en lo dispuesto en los artículos 5, 18, 24, 25, 27, 30, 32 y 148 de la Ley Federal de Derechos de Autor, se establecen las cláusulas siguientes:

PRIMERA – OBJETO: **"EL AUTOR Y/O TITULAR"**, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **"LA OBRA"**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

SEGUNDA – TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

TERCERA – ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para uso de **"LA OBRA"** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa, a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

CUARTA – EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Durango; por lo tanto, **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** conserva los derechos patrimoniales y morales de **"LA OBRA"**, objeto del presente documento.

QUINTA – CRÉDITOS: El Instituto Tecnológico de Durango y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **"AUTOR Y/O TITULAR"** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **"LA OBRA"**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA – AUTORÍA: **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **"LA OBRA"** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Durango, Dgo., a los **02 días del mes de junio de 2026**.

ALEJANDRO DANIEL HERNÁNDEZ RAMÍREZ

"EL AUTOR Y/O TITULAR"





Dedicatoria

A Dios, por darme la vida, la fortaleza y los procesos necesarios para este camino. Por siempre acompañarme en cada desafío, iluminar mis decisiones y sostenerme en los momentos más difíciles.

A nuestro Señor Jesucristo, por ser guía, esperanza y ejemplo de perseverancia, amor y servicio. Gracias por mostrarme que la fe puede sostener incluso los sueños que parecen más lejanos.

A mi madre, **Rosa Lidia Ramírez Lemus**, a quien dedico de manera muy especial este logro. Gracias por cada sacrificio, cada consejo, cada palabra de aliento y cada momento en que creíste en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Tu esfuerzo, amor incondicional y entrega han sido el pilar fundamental de mi formación como persona y profesionista. Este trabajo representa también años de tu lucha, dedicación y apoyo, no hay forma de mi parte de devolver todo lo que has hecho por mí. Ninguna palabra será suficiente para expresar la gratitud y admiración que siento por ti. Este logro es tan tuyo como mío.

A mi padre, por sus enseñanzas, por el esfuerzo realizado a lo largo de mi vida y por contribuir a la persona que soy hoy.

A mi tía, por su cariño, apoyo y confianza, que siempre han sido una fuente de motivación para continuar avanzando.

A mis hermanos, **David** y **Citlali**, por compartir conmigo alegrías, retos y experiencias que han enriquecido mi vida. Gracias por estar presentes y formar parte de mi historia.

A mis abuelos, por sus enseñanzas, valores y ejemplo de vida. De manera muy especial, a mi abuela **Lidia Lemus Sandoval**, quien siempre me acompaña, aunque físicamente ya no este conmigo. Sus enseñanzas han sido una bendición constante y una fuente de fortaleza en cada etapa de mi vida.





A la memoria de mi hermano **Erick**, quien partió antes de poder acompañarme hasta este momento. Aunque físicamente ya no está aquí, su recuerdo permanece en mi corazón y en cada uno de mis logros. Su memoria me inspira a seguir adelante y a valorar cada oportunidad que la vida me brinda.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación académica, profesional y humana. Gracias por acompañarme en este camino y por formar parte de este importante logro.





Resumen

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es una de las principales fuentes de energía para el crecimiento de microorganismos fotosintéticos y representa una de las variables de mayor importancia en la operación de fotobiorreactores. Sin embargo, en muchos sistemas de cultivo su medición se realiza de forma indirecta o limitada, dificultando el análisis de la relación entre la energía luminosa disponible y la producción de biomasa.

En este trabajo se desarrolló e implementó un sistema electrónico multiparámetro para el monitoreo de variables ópticas y fisicoquímicas asociadas al crecimiento de microalgas en un fotobiorreactor. El sistema integra sensores para la medición de radiación fotosintéticamente activa, absorbancia, temperatura, pH y conductividad eléctrica, así como módulos de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos. La arquitectura electrónica fue diseñada mediante una tarjeta de circuito impreso y un sistema embebido capaz de realizar mediciones continuas de forma automatizada.

La metodología se estructuró en tres etapas principales: análisis y selección de tecnologías de medición, diseño e implementación del sistema electrónico, y adquisición y análisis de datos experimentales. El sistema fue integrado a un fotobiorreactor utilizado para el cultivo de *Chlorella vulgaris*, donde se realizaron experimentos bajo diferentes niveles de iluminación. A partir de las mediciones obtenidas se determinó la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo mediante la diferencia entre la radiación incidente y la radiación transmitida.

Los resultados demostraron que el sistema desarrollado fue capaz de realizar el monitoreo continuo y estable de las variables de interés durante los experimentos. Asimismo, se observó que el incremento de la biomasa estuvo asociado con un aumento progresivo de la radiación fotosintéticamente activa absorbida y una disminución de la radiación transmitida a través del cultivo. Esta tendencia evidenció





la capacidad de las microalgas para captar una mayor fracción de energía luminosa conforme aumentó la concentración celular.

Con el propósito de describir cuantitativamente la relación entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida y la biomasa, se evaluaron diferentes estructuras matemáticas mediante técnicas de regresión y ajuste de modelos. Entre las formulaciones analizadas, el modelo racional presentó el mejor desempeño estadístico, reproduciendo adecuadamente la tendencia experimental observada en los distintos ensayos.

Los resultados obtenidos permitieron establecer una relación funcional entre la energía luminosa absorbida y el crecimiento microalgal, demostrando que la PAR absorbida constituye una variable adecuada para caracterizar el comportamiento energético del cultivo. Además, el sistema desarrollado representa una herramienta útil para el monitoreo de procesos biotecnológicos basados en microalgas y proporciona una base para futuras estrategias de control y optimización de fotobiorreactores.

Palabras clave: Radiación fotosintéticamente activa, fotobiorreactor, *Chlorella vulgaris*, biomasa microalgal, sistema de monitoreo, sensores ópticos, modelado matemático.





Abstract

Photosynthetically active radiation (PAR) is one of the main energy sources for the growth of photosynthetic microorganisms and represents one of the most important variables in the operation of photobioreactors. However, in many cultivation systems, its measurement is performed indirectly or in a limited manner, making it difficult to analyze the relationship between available light energy and biomass production.

In this work, a multiparameter electronic system was developed and implemented for monitoring optical and physicochemical variables associated with microalgal growth in a photobioreactor. The system integrates sensors for measuring photosynthetically active radiation, absorbance, temperature, pH, and electrical conductivity, as well as data acquisition, processing, and storage modules. The electronic architecture was implemented through a printed circuit board and an embedded system capable of performing continuous and automated measurements.

The methodology was structured into three main stages: analysis and selection of measurement technologies, design and implementation of the electronic system, and acquisition and analysis of experimental data. The system was integrated into a photobioreactor used for the cultivation of **Chlorella vulgaris**, where experiments were conducted under different illumination levels. From the acquired measurements, the photosynthetically active radiation absorbed by the culture was determined as the difference between incident and transmitted radiation.

The results demonstrated that the developed system was capable of continuously and reliably monitoring the variables of interest throughout the experiments. Furthermore, biomass growth was associated with a progressive increase in absorbed photosynthetically active radiation and a decrease in transmitted radiation through the culture. This trend evidenced the ability of microalgae to capture a greater fraction of light energy as cell concentration increased.





To quantitatively describe the relationship between absorbed photosynthetically active radiation and biomass production, different mathematical structures were evaluated using regression and model fitting techniques. Among the analyzed formulations, the rational model exhibited the best statistical performance, adequately reproducing the experimental trends observed in the different assays.

The obtained results made it possible to establish a functional relationship between absorbed light energy and microalgal growth, demonstrating that absorbed PAR is an appropriate variable for characterizing the energetic behavior of the culture. In addition, the developed system represents a useful tool for monitoring microalgae-based biotechnological processes and provides a foundation for future photobioreactor control and optimization strategies.

Keywords: Absorbed photosynthetically active radiation, photobioreactor, *Chlorella vulgaris*, microalgal biomass, monitoring system.

