



# Ntthe

*Ntthe*, palabra ña'ihò (otomí) que significa "vínculo" o "enlace" (se pronuncia "enté")

ISSN 2007-9079

Revista electrónica de difusión científica, tecnológica y de innovación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro

ISSN 2007 - 9079 Periodicidad: Cuatrimestral, enero - abril - 2024, num. 44

# DIFUSIÓN CIENTÍFICA

Ciencias Naturales, Ingeniería,  
Tecnología e Innovación



## Directorio

### PRESIDENTE

LIC. MAURICIO KURI GONZÁLEZ

### VICEPRESIDENTE

DRA. MARTHA ELENA SOTO OBREGÓN

### DIRECTOR GENERAL

DR. ENRIQUE RABELL GARCÍA

### SECRETARIO

LIC. RENÉ MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

**DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS.** Año 15, num. 44, enero - abril 2024. *Nthe* es una publicación cuatrimestral editada por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ): calle Luis Pasteur Sur núm. 36, col. Centro; CP 76000; tel. (442) 214 3685; www.concyteq.edu.mx; nthe@concyteq.edu.mx. Editor responsable: Felipe de Jesús Esperón Valenzuela. Reserva de derechos al uso exclusivo núm. 04-2018-111410321700-203; ISSN 2007-9079, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Felipe de Jesús Esperón Valenzuela: calle Luis Pasteur Sur núm. 36, col. Centro; CP 76000. Fecha de última modificación: abril de 2024

*Nthe* ha sido aprobada para su inclusión en el Índice del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX)

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

Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación siempre y cuando se cite la fuente.

**EDICIÓN Y DISEÑO DE LA PUBLICACIÓN**  
LIC. FELIPE DE JESÚS ESPERÓN VALENZUELA

**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
DRA. MARÍA LUISA ÁLVAREZ MEDINA  
LIC. MONSERRAT ACUÑA DELGADO

*Nthe*, Publicación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro:  
<http://nthe.mx/>

Luis Pasteur Sur núm. 36  
Col. Centro, CP 76000  
Tel. 52 (442) 214 3685 / 212 7266, ext. 105  
Querétaro, Qro., México

## Consejo editorial

### Investigadores nacionales

#### Dr. Alejandro Manzano Ramírez

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, unidad Querétaro

#### Dr. Flora Mercader Trejo

Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui

#### Dr. Sergio Barrera Sánchez

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, campus Querétaro

#### Dr. Martha Cruz Soto

Universidad del Valle de México, campus Querétaro

#### Dr. Gabriela Calderón Guerrero

Facultad de Psicología, Universidad Autónoma de Querétaro

#### Dr. Víctor Castaño Meneses

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM, campus Juriquilla

#### Dr. Rolando Salinas García

Unidad Multidisciplinaria de Estudios Sobre el Trabajo, Universidad Autónoma de Querétaro

#### Dr. Miguel Martínez Madrid

Instituto Mexicano del Transporte, SCT

#### Dr. Daniel Hiernaux Nicolás

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Autónoma de Querétaro

#### Dr. Gabriel Corral Velázquez

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Autónoma de Querétaro

#### Dr. Salvador Echeverría Villagómez

Centro Nacional de Metrología

#### Dr. Alberto Traslosheros Michel

Universidad Aeronáutica en Querétaro

#### Dra. Alejandra Urbiola Solís

Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Querétaro



#### Dr. Jóns Sánchez Aguilar

Instituto Tecnológico de Querétaro, Tecnológico Nacional de México

#### Dr. Octavio López Millán

Instituto Tecnológico de Hermosillo

#### Dra. Marcela Hernández Romo

Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa

#### Mtra. Martha Díaz Muro

Instituto Tecnológico de Hermosillo, Tecnológico Nacional de México

#### Dr. Sergio Sandoval Godoy

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Sonora

#### Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López

Universidad Autónoma de Querétaro

#### Dr. Jorge Raúl Palacios Delgado

Universidad del Valle de México, campus Querétaro

#### Dra. María Guadalupe Ordaz Cervantes

Universidad Autónoma de Querétaro

#### Mtra. Eva Leticia Ortiz Ávalos

Universidad Nacional Autónoma de México

#### Dra. Adriana del Carmen Gallegos Melgar

CONACYT - COMIMSA

#### Dra. Ana Isabel Moreno Calles

Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Morelia.

#### Dra. Olivia Solís Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro

### Externo

#### Dr. Víctor Hugo Muciño Quintero

Universidad de West Virginia, EUA

La revista electrónica *Nthe* es financiada en su totalidad por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro en el marco del presupuesto autorizado el día 27 de diciembre de 2023. (Publicado en el periódico oficial del estado de Querétaro, La Sombra de Arteaga).

---

**Mtra. Carla Cristina Camacho Gallegos**  
Universidad Tecnológica de Corregidora

**Dr. Roberto De la Llata Gómez**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro

**Dr. Edmundo Mateo Mercado Silva**  
Facultad de Química  
Universidad Autónoma de Querétaro

**Dr. Mauricio Torres Arellano**  
Ingeniería Mecánica  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial  
CIDESI

**Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez**  
Facultad de Química  
Universidad Autónoma de Querétaro

**Dr. Alfredo Cristóbal Salas**  
Facultad de Ingeniería en Electrónica y  
Comunicaciones  
Universidad Veracruzana

## Comité de evaluadores

---

**Dra. Magdalena Mendoza Sánchez**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro

**Dr. Juan Manuel García Guendulain**  
Universidad Politécnica de Querétaro

**Dr. Ignacio Elizalde Martínez**  
Instituto Politécnico Nacional

**Dra. Alejandra Álvarez López**  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro

**Dra. Maricela González Leal**  
Facultad de Química  
Universidad Autónoma de Querétaro

**Ing. Antonia Elizabeth Torres Balcazar**  
Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Tecnológico Nacional de México  
San Juan del Río

## Comentario *Nthe*

Estimados lectores, en esta ocasión, presentamos siete artículos, todos ellos producto de investigaciones y aplicaciones tecnológicas que las y los investigadores realizan dentro de sus áreas del conocimiento.

El artículo que abre el número 45 de la revista, “Avances en técnicas de comunicación internúcleo para sistemas automotrices”, tiene como objetivo realizar un análisis detallado de las arquitecturas multinúcleo, evaluando distintos mecanismos de comunicación, como la memoria compartida y el paso de mensajes, para identificar las mejores prácticas en la ejecución de tareas en paralelo. Se hace énfasis en la diferencia entre las soluciones tradicionales y las necesidades específicas de los sistemas integrados en vehículos, especialmente en la coherencia de datos y la predictibilidad en entornos de tiempo real. Los hallazgos destacan la importancia de una comunicación internúcleo eficiente ante la creciente complejidad de los sistemas, en el cuál la implementación del modelo LET (Logical Execution Time), junto con otras técnicas analizadas, ofrece ventajas significativas en términos de determinismo y gestión de latencia. Este análisis sistemático proporciona una perspectiva integral sobre cómo abordar los desafíos emergentes en la comunicación entre núcleos en la industria automotriz, marcando un camino hacia sistemas más robustos y confiables, donde técnicas y modelos se presentan como implementaciones prácticas para mitigar o eliminar las limitaciones de las técnicas convencionales.

En el siguiente artículo, “Desarrollo y validación de una alternativa natural a glifosato”, es un trabajo donde se formularon cinco emulsiones con ácido acético o ácido cítrico, limoneno y quitosano a fin de obtener propiedades herbicidas naturales que sean una alternativa al uso de glifosato. Esto se evaluó en modelos vegetales *in vitro*, *in vivo* [semillas de *Medicago sativa* (alfalfa), *Petroselinum sativum var. latifolium* (perejil liso) y *Dysphania ambrosioides* (epazote) y plántulas de *Solanum lycopersimum* (jitomate), *Cucumis sativus* (pepino), plantas de *Ocimum basilicum* (albahaca) y *Capsicum annuum L.* (chile serrano)] e *in situ* (plantas silvestres) para determinar la eficacia de ésta con respecto a su posible uso como sustituto de glifosato (agroquímico usado para eliminar malas hierbas o herbáceas indeseables). Dentro de los resultados obtenidos se tuvo una pronta y adecuada acción herbicida *in vitro* sobre el 100% de las especies de semillas, *in vivo* con un 98% de las plántulas y plantas evaluadas al usar la emulsión compuesta de 5%v/v de limoneno y 5%p/v ácido cítrico, dicha formulación fue llevada a campo para su validación y se observó inhibición y daño en especies silvestres.

En el artículo número 3 de la revista, “Análisis y Simulación de Pulso Trapezoidal de Corriente – Voltaje por Medio de Redes Formadoras”, se presenta el diseño de redes formadoras de pulso considerando modelos de A. E. Guillemin para un pulso de corriente – voltaje con las características definidas de forma trapezoidal, magnitud y tiempo de duración. Una red formadora de pulso es un circuito eléctrico en configuración particular, estas se forman de capacitores e inductores. Se desarrolló una corrida de programación en MATLAB® para el cálculo de los parámetros y se armaron circuitos en el programa ATP para ver su resultado en simulación en estado transitorio de la corriente – voltaje en una carga puramente resistiva. Dependiendo de la aplicación del pulso se puede utilizar por ejemplo la ventaja que tiene la Red tipo E, debido a que todos los capacitores son de valores iguales como se ve en la simulación, o si es importante la aproximación de la forma de onda de corriente – voltaje puede ser la Red tipo C como se observa en la tabla de valores y simulación

El artículo: “Análisis del contenido y extracción asistida por ultrasonido de naringina de la cáscara de toronja en tres variedades cultivadas en México”, es un estudio que se enfocó en aprovechar el albedo de la toronja para obtener naringina mediante extracción asistida por ultrasonido (EAU), una metodología amigable con el ambiente. La naringina extraída se cuantificó mediante cromatografía de líquidos de alta resolución acoplada al detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) y su naturaleza química se confirmó mediante resonancia magnética nuclear (RMN). Además, se realizó el estudio comparativo de la calidad en tres variedades de la toronja (roja, rosa y blanca) mediante su análisis de color, sólidos solubles totales, acidez y pH.

## Comentario *Nthe*

“Correlación entre valores medios de volumen vehicular y siniestros en carreteras federales” es un estudio que tiene por objeto la estimación de la correlación entre los volúmenes de servicio publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) y la ocurrencia de siniestros en los tramos carreteros vigilados por la Guardia Nacional (GN) de 2015 a 2021 en México. Se agruparon los datos por número de carriles y debido a que los tramos no eran homogéneos en su longitud, se transformaron las variables de siniestralidad por unidad de kilómetro, posteriormente se establecieron rangos por volumen de servicio (VHP) y para cada intervalo de clase se obtuvieron los valores medios de ambas variables. A causa de que se observó alta dispersión de los datos para valores de VHP con régimen de flujo inestable, fue necesario acotar el análisis a volúmenes de servicio menores, en el caso de carreteras multicarril, se acotaron los valores que corresponden a un nivel de servicio C y para carreteras de 2 carriles hasta un VHP de 1,500. Con esta estructura de los datos se determinaron regresiones y los mejores resultados se obtuvieron con el ajuste lineal.

El artículo: “Determinación numérica de permeabilidades de fibras unidireccionales en arreglos asimétricos”, presenta una metodología computacional para determinar la permeabilidad (transversal y longitudinal) de fibras unidireccionales a partir del concepto de flujo en celdas unitarias. Después, dicha metodología es aplicada para la determinación de la permeabilidad de arreglos asimétricos en serie (1 x 2), formados a partir de la combinación de un conjunto de celdas unitarias propuestas. Finalmente, se explora la posibilidad de estimar de manera analítica la permeabilidad (transversal y axial) de los arreglos de fibras a partir de los valores de las permeabilidades de celdas unitarias, se encontró que dicha estimación es viable mediante fórmulas simples para el caso de permeabilidades transversales, pero no para el caso de permeabilidades axiales.

La revista cierra con el interesante artículo “Instrumentos aplicados en métodos acústicos. Una revisión en frutos”, analiza los instrumentos en los prototipos utilizados en los métodos acústicos no destructivos, para medir la calidad de las propiedades físicas de las frutas, como son la madurez y la firmeza. A través de la revisión sistemática de literatura se exploran y comparan los métodos de evaluación de la calidad que se han empleado en estudios recientes teniendo como enfoque los métodos acústicos. Para ello, se utilizó la metodología Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses (PRISMA), que sigue un proceso basado en cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. Después de aplicar los criterios para la selección de documentos en las bases de datos de ScienceDirect y Google Scholar, se consideraron los artículos más relevantes para su análisis. Los resultados muestran que la técnica mayormente utilizada ha sido la acústica, y que la evaluación de la calidad se orienta hacia la firmeza.

Esperemos que la lectura crítica y propositiva de los textos que se publican, promuevan el intercambio de ideas y la reflexión para seguir generando conocimiento.

Dr. Enrique Rabell García  
Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro

## ÍNDICE

### Avances en técnicas de comunicación internúcleo para sistemas automotrices

Carlos Antonio Mosqueda Arvizu  
Julio Alejandro Romero González  
Facultad de Informática  
Universidad Autónoma de Querétaro

1

### Desarrollo y validación de una alternativa natural a glifosato

Adrián Esteban Ortega Torres  
Elsy Ruby García Cervantes  
Diana Victoria Melo Sabogal  
Carlos Alberto Cruz Ferrer  
Diana Alonso Segura  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro  
Academia de Química y Biotecnología  
Universidad Tecnológica de Corregidora

12

### Análisis y Simulación de Pulso Trapezoidal de Corriente – Voltaje por Medio de Redes Formadoras

Daniel Hernández Arriaga  
Cynthia Rocío Flores Juárez  
Isaac Hernández Arriaga  
Miguel Ángel González Ortíz  
Rodrigo Rodríguez Rubio  
Miguel Ángel Ramírez Reséndiz  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro  
División Industrial Área de Nanotecnología  
Universidad Tecnológica de Querétaro  
Departamento de Metal Mecánica  
Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro

21

### Análisis del contenido y extracción asistida por ultrasonido de naringina de la cáscara de toronja en tres variedades cultivadas en México

María J. Monroy-Ramírez  
Odette Flores-Pérez  
Ángel R. Flores-Sosa  
Diana López-Fitz  
Rebeca Rodríguez-Martínez  
Alejandro Núñez-Vilchis  
Areli Rodríguez-Ontiveros  
M. Moustapha Bah  
Eloy Rodríguez de León  
Facultad de Química  
Universidad Autónoma de Querétaro

30

### Correlación entre valores medios de volumen vehicular y siniestros en carreteras federales

Eduardo Daniel García-Gutiérrez  
Ana Cecilia Cuevas-Colunga  
Wendy Alejandra Casanova-Zavala  
Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte  
Instituto Mexicano del Transporte

38

### Determinación numérica de permeabilidades de fibras unidireccionales en arreglos asimétricos

Jaqueline de los Ángeles Viveros González  
Edgar Adrián Franco Urquiza  
Carlos Amir Escalante Velázquez  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial Querétaro

50

### Instrumentos aplicados en métodos acústicos. Una revisión en frutos

Martha Elva Escutia Vargas  
Javier García Pérez  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Autónoma de Querétaro

60

# Avances en técnicas de comunicación internúcleo para sistemas automotrices

Mosqueda Arvizu Carlos Antonio<sup>1</sup>; Romero González Julio Alejandro<sup>2</sup>  
Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.  
email: acmos25@gmail.com<sup>1</sup>; email: julio.romero@uaq.mx<sup>2</sup>

## Resumen

La industria automotriz actual está incorporando procesadores multinúcleo y microcontroladores para satisfacer las demandas de tecnologías avanzadas, como la conducción autónoma, para cumplir con los estándares de seguridad más recientes. Esta evolución plantea desafíos significativos, destacando la necesidad de una comunicación eficiente entre los núcleos de procesamiento para la ejecución paralela de tareas. Aunque la comunicación entre núcleos no es un problema nuevo, las soluciones existentes no se ajustan completamente a las exigencias de los sistemas integrados en tiempo real en vehículos. Este artículo realiza un análisis detallado de las arquitecturas multinúcleo, evaluando distintos mecanismos de comunicación, como la memoria compartida y el paso de mensajes, para identificar las mejores prácticas en la ejecución de tareas en paralelo. Se hace énfasis en la diferencia entre las soluciones tradicionales y las necesidades específicas de los sistemas integrados en vehículos, especialmente en la coherencia de datos y la predictibilidad en entornos de tiempo real. Los hallazgos destacan la importancia de una comunicación internúcleo eficiente ante la creciente complejidad de los sistemas, en el cuál la implementación del modelo LET (Logical Execution Time), junto con otras técnicas analizadas, ofrece ventajas significativas en términos de determinismo y gestión de latencia. Este análisis sistemático proporciona una perspectiva integral sobre cómo abordar los desafíos emergentes en la comunicación entre núcleos en la industria automotriz, marcando un camino hacia sistemas más robustos y confiables, donde técnicas y modelos se presentan como implementaciones prácticas para mitigar o eliminar las limitaciones de las técnicas convencionales.

**Palabras clave:** Tiempo de ejecución lógica (LET), Coherencia de datos, Modelos de comunicación, Sistemas de tiempo real.

## Abstract

Nowadays the automotive industry is incorporating multi-core processors and microcontrollers to meet the demands of advanced technologies, such as autonomous driving, and to comply with the most recent safety standards. This evolution presents significant challenges, highlighting the need for efficient communication between processing cores for parallel task execution. While inter-core communication is not a new problem, existing solutions do not fully meet the demands of real-time integrated systems in vehicles. This article provides a detailed analysis of multi-core architectures, evaluating various communication mechanisms, such as shared memory and message passing, to identify the best practices in parallel task execution. It emphasizes the difference between traditional solutions and the specific needs of vehicle-integrated systems, especially regarding data coherence and predictability in real-time environments. The findings highlight the importance of efficient inter-core communication in the face of increasing complexity of systems, in which the implementation of the LET (Logical Execution Time) model, along with other analyzed techniques, offers significant advantages in terms of determinism and latency management. This systematic analysis provides a comprehensive perspective on how to address emerging challenges in inter-core communication in the automotive industry, paving the way for more robust and reliable systems, where techniques and models are presented as practical implementations to mitigate or eliminate the limitations of conventional techniques.

**Key Words:** Logical Execution Time, Data Coherency, Communication Models, Real-Time Systems.

---

Artículo arbitrado

---

Recibido:

16 de febrero de 2024

Aceptado:

8 de marzo de 2024



## Introducción

Los avances tecnológicos en el sector automotriz han hecho que sistemas de seguridad, confort y sistemas con nuevas funcionalidades sean más sofisticados y complejos. Estos avances han creado la necesidad de sistemas con capacidades avanzadas de procesamiento de datos que puedan satisfacer eficazmente estas demandas de tecnologías innovadoras. Estos sistemas avanzados son esenciales para un rendimiento y seguridad óptimos en los vehículos modernos. De acuerdo con Beckert (2019), funcionalidades como la conducción altamente automatizada de los Sistemas de Asistencia y Conducción Autónoma (ADAS), así como las actualizaciones a través del aire (*Over-The-Air*) o la comunicación car2x, son uno de los principales impulsores de la industria automotriz en la actualidad.

Hoy en día, un vehículo de cualquier gama contiene redes complejas de computadoras y unidades de procesamiento llamadas Unidades de Control Electrónico (ECU). Beckert (2019, p.173) señala que estas unidades intercambian información continuamente y han ido evolucionando, de tal manera que se han hecho más complejas en hardware y, en consecuencia, en software, un ejemplo de ello es el software implementado para un automóvil Volvo se compone de aproximadamente 100 millones de líneas de código, que se derivan de alrededor de 100 000 requisitos funcionales (Antinyan, 2020).

Para integrar más funcionalidades en las ECUs, Beckert (2019) sugiere que es necesario reemplazar el hardware actual por uno con mayor poder de procesamiento. Esta sustitución se ha hecho con procesadores con velocidades de reloj más altas y un número mayor de núcleos integrados. Estos chips, debido a esta y otras personalizaciones de hardware, se conocen comúnmente como Sistema multiprocesador en un chip (MPSoC). Como indican Monot et al. (2010, p. 2), “estas ECU multinúcleo ofrecen nuevas características, como niveles más altos de paralelismo, lo que facilita el cumplimiento

de los requisitos de seguridad de la norma ISO 26262 y se puede aprovechar en varios otros casos de uso automotriz.” Para beneficiarse de esta distribución de procesamiento, esto implica distribuir porciones funcionales de software en diferentes núcleos, adaptando software que tradicionalmente fue diseñado para ejecutarse en un solo núcleo. Esta adaptación tiene implicaciones en los sistemas operativos (SO), los modelos de comunicación y las arquitecturas de hardware donde se implementan, tales como memoria compartida, memoria de Scratchpad y redes en chips (NoC) (Schoeberl et al., 2015).

Hung et al. (2012) clasifican las arquitecturas multinúcleo en dos categorías principales: a) homogéneas y b) heterogéneas.

- Arquitecturas homogéneas: estas son arquitecturas simétricas en las que todos los núcleos del procesador son idénticos y de propósito general.
- Arquitecturas heterogéneas: estas arquitecturas integran diferentes núcleos para aumentar la eficiencia de los sistemas para aplicaciones específicas.

De acuerdo con Hung et al., (2012), “Para las aplicaciones integradas que apuntan a la eficiencia energética, generalmente se adoptan arquitecturas heterogéneas” (p. 31).

En este contexto, la necesidad de intercambio de datos entre núcleos se vuelve crucial, especialmente en escenarios como la cadena de eventos sensor-procesamiento-actuador, donde las funciones requieren un intercambio de datos continuo. En los sistemas de tiempo real, este escenario es común y presenta desafíos únicos, donde la latencia, la coherencia de los datos y el flujo de datos son críticos al implementar la funcionalidad de seguridad y control.

En los sistemas clásicos de un solo núcleo, la comunicación entre tareas y componentes de software se hace utilizando un mismo espacio de memoria. En este enfoque de comunicación explícita, que permite

el acceso sin restricciones a las variables compartidas, se requiere implementar mecanismos de protección para evitar problemas de coherencia de datos en un escenario donde múltiples tareas con distintas prioridades acceden una misma dirección de memoria. Sin embargo, dichos métodos, al ser aplicados en sistemas de múltiples núcleos, pueden degradar el rendimiento y mermar sus ventajas de procesamiento paralelo. Esto se puede observar en escenarios donde un recurso de memoria utilizado por una tarea en un núcleo evita las operaciones por parte de tareas en otros núcleos de procesamiento.

Los sistemas multinúcleo como los MPSoC son útiles debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y su eficiencia energética. Dichos sistemas se comparten el acceso al mismo espacio de memoria entre dos o más entidades de procesamiento en paralelo, que incluso pueden estar ejecutando diferentes sistemas operativos. Estas arquitecturas plantean retos, particularmente en escenarios donde la coherencia de los datos puede verse comprometida debido al acceso simultáneo a una misma ubicación de memoria por múltiples núcleos, así como por operaciones de lectura y escritura que se superponen. Dado que la coherencia de datos puede ser muy crítica en los sistemas de tiempo real, se han desarrollado y estudiado varias propuestas implementadas en hardware, en software y en una combinación de ambos.

En este artículo se presenta una perspectiva general de los diversos mecanismos y modelos de comunicación que han sido desarrollados recientemente, el cual busca responder a las siguientes preguntas:

- ¿Qué mecanismos y modelos de comunicación entre núcleos se utilizan comúnmente hoy en día en los Sistemas Embebidos en Tiempo Real?
- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de tales modelos y mecanismos?
- ¿Qué modelos o mecanismos se adaptan mejor a las necesidades de tiempo real de la industria automotriz?

Al responder estas preguntas, se pretende proveer una visión detallada de las propuestas y sus características, que pueden servir a futuros trabajos como apoyo para la selección de una solución dependiendo las necesidades de los mismos.

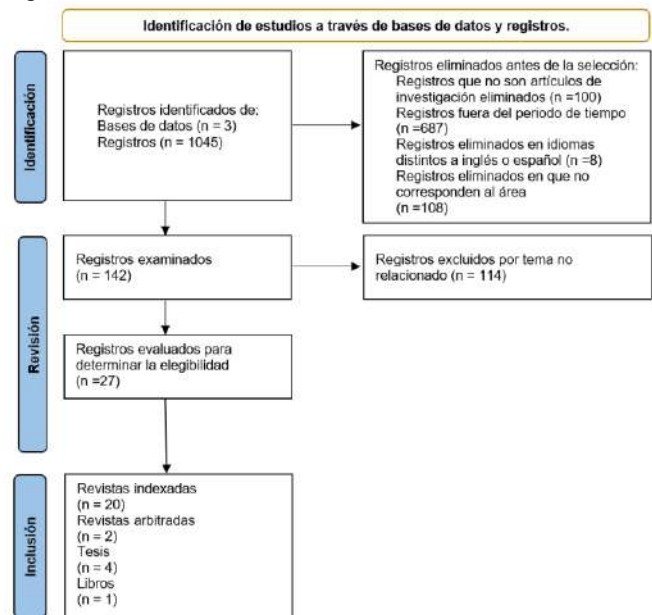
## Metodología

Para realizar el análisis sistemático se utilizaron bases de datos como *Google Scholar*, *Science Direct* y *HAL Open Science* para realizar la búsqueda de los documentos, la búsqueda se enfocó principalmente en los siguientes tipos de documentos:

- Artículos de divulgación científica
- Artículos y estudios de investigación
- Libros técnicos especializados
- Tesis de grado (maestría y doctorado)

Para realizar la búsqueda fue empleado el siguiente *prompt* en el que se incluyó el tema principal y algunas palabras clave: *Embedded Systems AND Multicore OR Embedded Systems AND Interprocessor OR Interprocessor AND communication OR intercore communication OR multicore message*.

Figura 1: Análisis sistemático



Fuente: elaboración propia

En la figura 1 se muestran las etapas seguidas por este análisis sistemático. Con el propósito de identificar los artículos considerados para el análisis en esta revisión, se definieron los criterios de inclusión y exclusión que se detallan a continuación:

#### Criterios de inclusión:

1. Trabajos publicados entre 2011 y 2021.
2. Artículos en inglés y en español.
3. Trabajos relacionados directamente con los términos de búsqueda de acuerdo con las preguntas de investigación planteadas y que incluyen los siguientes conceptos clave:

- Task set core partitioning
- Task mapping
- Synchronization
- Logical Execution Time
- Explicit communication
- Implicit communication
- Message Passing
- Shared Memory
- Scratchpad Memory
- Cache
- Time-triggered
- Worst case execution time (WCET)
- Data coherency
- Lock-free
- System-level logical execution time (SL LET)
- Real time systems
- Effect chain
- Concurrent access
- Lock/Semaphore
- Deterministic behavior
- Embedded

4. Dado que la comunicación entre núcleos puede ser un tema muy general, ya que existe en diferentes formas según el tipo de sistema (por ejemplo, en CPU de propósito general, sistemas sin requisitos de tiempo real), se consideraron también los siguientes criterios:

- Modelos de comunicación entre núcleos
- Mecanismos de comunicación entre núcleos

- Planificación (Schedulers)
- Mecanismos de protección de datos (por ejemplo, semáforos, etc.).
- Tiempo real
- Sistemas embebidos

#### Criterios de exclusión:

- Comunicación entre hilos
- Sobrecarga de comunicación
- Soluciones basadas en descripción de hardware (p. ej. Arreglos de compuertas lógicas programables, FPGA por sus siglas en inglés).
- Sistemas distribuidos
- Tiempo de ejecución lógica a nivel sistema
- Métodos de prueba

Dentro de estas categorías se excluyeron un total de 114 artículos que aportan a otros temas de investigación que si bien están relacionados no aportan información útil para esta investigación.

De los 27 documentos consultados se clasifican de la siguiente forma:

**Tabla 1:** Documentos consultados en bases de datos

Tipo de Documento	Autores	Editor
Revista Indexada	Gemlau, K. B., Kohler, L., & Ernst, R. (2021)	IEEE
Revista Indexada	Masood, S., Khan, S. A., & Hassan, A. (2021)	IEEE
Revista Indexada	Antinyan, V. (2020)	ACM
Revista Indexada	Gemlau, K.-B., Köhler, L., Ernst, R., & Quinton, S. (2020)	ACM
Revista Indexada	Igarashi, S., Ishigooka, T., Horiguchi, T., Koike, R., & Azumi, T. (2020)	IEEE
Revista Indexada	Martínez, J., Sañudo, I., & Bertogna, M. (2020)	Springer
Tesis	Urbina, M. (2020)	Universität Siegen
Tesis	Beckert, M. (2019)	Technische Universität Braunschweig
Libro	Oshana, R. (2019)	Elsevier
Revista Indexada	Pazzaglia, P., Biondi, A., & di Natale, M. (2019)	IEEE
Revista indexada	Tabish, R., Mancuso, R., Wasly, S. et al. (2019)	Springer
Revista Indexada	Tang, X., Zhai, J., Qian, X., & Chen, W. (2019)	ACM

Tesis	Toscanelli, M. (2019)	Universita di Bologna
Revista	Biondi, A., Pazzaglia, P., Balsini, A., & Natale, M. di. (2017)	ReTiS Lab
Revista Indexada	Hamann, A., Dasari, D., Kramer, S., Pressler, M., & Wurst, F. (2017)	Dagstuhl
Tesis	Schardl, T. B. (2016)	MIT
Revista Indexada	Schoeberl, M., Sorensen, R. B., & Sparso, J. (2015)	IEEE
Revista Indexada	Sørensen, R. B., Puffitsch, W., Schoeberl, M., & Sparsø, J. (2015)	IEEE
Revista Indexada	Waldherr, S., Knust, S., & Aust, S. (2015)	Elsevier
Revista Indexada	Buono, D., de Matteis, T., Mencagli, G., & Vanneschi, M. (2014)	IEEE
Revista Indexada	Hung, S. H., Chiu, P. H., Tu, C. H., Chou, W. T., & Yang, W. L. (2014)	Springer
Revista Indexada	Ritson, C. G., Sampson, A. T., & Barnes, F. R. M. (2012)	Elsevier
Revista Indexada	Hung, S. H., Chiu, P. H., & Shih, C. S. (2011)	ACM
Revista Indexada	Hung, S. H., Tu, C. H., & Yang, W. L. (2011)	Elsevier
Revista Indexada	Jetley, P., & Kale, L. v. (2011)	IEEE
Revista Indexada	Petropoulos, G., & Fenves, G. L. (2010)	Springer
Revista	Monot, A., Navet, N., Bavoux, B., & Simonot-Lion, F. (2010)	HAL INRIA

Fuente: elaboración propia

## Análisis de la documentación

Los documentos de investigación seleccionados fueron analizados para identificar atributos para su clasificación. Luego se definieron categorías para ayudar a proporcionar respuestas a las preguntas de investigación. Según Hernández-Sampieri (2017), Creswell (2017 y 2013a), Nalzaró (2012), Lester y Lester (2012), este estudio puede clasificarse como una investigación cualitativa con alcance descriptivo, ya que uno de sus objetivos es comparar diferentes grupos, categorías o tipos de fenómenos en términos de una variable o propiedad, la intención es precisar propiedades, características y perfiles en grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que pueda ser sometido a análisis (Hernández-Sampieri y Mendoza Torres, 2018).

Para definir las categorías se extrajeron palabras clave de cada uno de los documentos, con la finalidad de identificar puntos de convergencia entre ellos, que permitan asociar similitudes y diferencias en cuanto a metodologías, objeto de estudio, objetivos y resultados.

Los métodos de comunicación presentados en los documentos analizados se enfocan principalmente en el intercambio de datos entre tareas que se ejecutan en paralelo en diferentes núcleos. Los mecanismos básicos para implementar la comunicación son la memoria compartida y el paso de mensajes, este último presentado en varias formas que van desde implementaciones a nivel de *software* que son independientes de los mecanismos de *hardware* subyacentes hasta soluciones de *hardware* muy complejas donde, en combinación con el esquema de memoria compartida, presentan soluciones como *Scratchpad*. memoria junto con soluciones especializadas *Network-on-Chip* (NoC). Tales soluciones varían en términos de complejidad, latencia de transmisión de datos y protección al acceso concurrente.

Las soluciones que se analizaron en los documentos que pertenecen al inicio del periodo temporal seleccionado presentan soluciones en forma de bibliotecas de *software* cuyo objetivo es adaptar estándares de comunicación previamente desarrollados para sistemas distribuidos, como la interfaz de paso de mensaje (MPI).

Según Hung et al., (2011), estándares como MPI “no son adecuados para sistemas embebidos ya que consumen demasiados recursos de un sistema y muchas de las funciones que proporcionan son excesivas” (p. 193). La Asociación *Multicore* propuso otro estándar llamado Interfaz de programación de aplicaciones de comunicaciones multinúcleo (MCAPI), que fue diseñado específicamente para sistemas integrados.

Hung et al., (2012), mencionan en el momento de su documento de investigación que el estándar apenas se probó y solo en sistemas heterogéneos que utilizan arquitecturas x86 y PowerPC. Esa es la razón por la cual estos autores propusieron su propia biblioteca, llamada MSG, que abstrae la implementación de paso de mensajes del *hardware* subyacente para que se vuelva portátil y por lo tanto, se use en diferentes arquitecturas de *hardware*, lo cual permite que el usuario implemente los mecanismos de capa baja, lo que podría implicar el uso de *hardware* como acceso

directo a memoria (DMA), memoria compartida, NoC y otras que son soluciones basadas en *hardware* de distintas familias de microcontroladores.

En los sistemas en tiempo real se prefiere la memoria compartida (comunicación explícita) al paso de mensajes, ya que la sobrecarga y la latencia son menores que las de las soluciones basadas en *software* de paso de mensajes, siendo también más portátiles puesto que la dependencia del *hardware* es mucho menor (excluyendo los sistemas de memoria distribuida) en comparación con las soluciones de paso de mensajes basadas en *hardware*.

Dado que los mecanismos por sí solos no son suficientes para hacer frente a las necesidades de comunicación entre núcleos, se proponen modelos que se implementan sobre memoria compartida, para garantizar la coherencia de los datos durante la comunicación, ya que los diseños en sistemas de tiempo real para la industria automotriz, la incoherencia de datos puede ser un problema muy crítico que puede afectar a los sistemas de control, ya que dependen en gran medida de los datos que reciben como entrada (variables), para proporcionar la salida deseada (cadenas de ejecución de sensor-actuador).

La comunicación implícita también se presenta en publicaciones posteriores como una solución, la cual esta descrita como parte del estándar de arquitectura de *software* automotriz AUTOSAR, o arquitectura automotriz de sistema abierto por sus siglas en inglés, “Esta semántica (...) se enfoca principalmente en mantener la consistencia de los datos para evitar las trampas de la comunicación explícita” (Hamann et al., 2017, p. 7). La comunicación implícita requiere tareas para hacer copias locales de los datos compartidos a través de variables compartidas al comienzo de su ejecución.

Según Hamann et al., (2017), “Esto asegura que la tarea funcione en la misma copia a lo largo de su ejecución, y también preserva el estado consistente de los datos” (p. 7). El único problema para este tipo de modelo es que no es inmune a la fluctuación de muestreo, que ocurre cuando una tarea de productor se ejecuta a un ritmo más rápido que las tareas de

consumidor. Dicho modelo también se conoce como tiempo de ejecución limitado "donde las operaciones de lectura y escritura pueden ocurrir en cualquier momento dentro de intervalos que dependen de la activación de la tarea, la fluctuación de muestreo, el tiempo de respuesta en el mejor y el peor de los casos" (K.-B. Gemmlau et al., 2020, p. 9).

El problema de fluctuación de muestreo se intensifica cuando hay ejecución paralela de tareas, motivo por el que la comunicación se vuelve no determinista por la falta de sincronización entre los planificadores en diferentes núcleos, especialmente en sistemas heterogéneos.

Para abordar los problemas de la comunicación implícita, el modelo LET ha atraído el interés en los últimos años. “A diferencia del caso implícito, LET impone la comunicación de la tarea en tiempos deterministas, correspondientes a los tiempos de activación de la tarea” (Martínez et al., 2020, p. 13). LET se derivó del lenguaje de programación Giotto, que se activa con el tiempo y fue diseñado para sistemas de control con restricciones estrictas de tiempo real. “Es un concepto de programación en tiempo real que garantiza el determinismo temporal al desvincular la computación y la comunicación” (Hamann et al., 2017, p. 8).

De acuerdo con Igarashi et al (2020), LET funciona fijando los tiempos de procesamiento de lectura y escritura independientemente del tiempo de ejecución de la tarea. Este modelo elimina la necesidad de métodos de sincronización como *mutex*, semáforos, áreas exclusivas, etc. También proporciona determinismo al fijar las operaciones de lectura y escritura en el tiempo, sacrificando la latencia a favor de la consistencia de los datos.

El paradigma del modelo LET se originó en un contexto con reglas definidas para sistemas en tiempo real con múltiples tareas que se ejecutan periódicamente, forzando el determinismo en las cadenas de eventos donde la consistencia de datos es un requisito. Esto es un aspecto importante necesario para los sistemas de control. Sin embargo, si este modelo se implementa con su definición original en

sistemas multinúcleo, la falta de mecanismos de sincronización entre tareas que se ejecutan en paralelo, accesos de lectura y accesos de escritura pueden superponerse, según Beckert (2019).

Recientemente se han presentado nuevas propuestas en las que el modelo LET, donde se combina con otros algoritmos existentes o con métodos heurísticos con el objetivo de mitigar o eliminar las desventajas y proporcionar soluciones útiles para los sistemas de tiempo real. Algunas otras propuestas, como la de Gemlau et al (2020), se enfocan en derivar modelos de LET para que puedan ser aplicados en otros contextos como en aplicaciones industriales donde los sistemas distribuidos pueden beneficiarse de LET, pero desde una perspectiva diferente, debido a la latencia en tales redes es mucho mayor que la que existe entre los núcleos integrados. Por lo tanto, se propone una extensión denominada tiempo de ejecución lógica a nivel sistema (SL-LET). La Tabla 2 muestra los distintos ambientes en los que se probó cada método, así como las mediciones en latencia de intercambio de datos entre tareas.

## Resultados

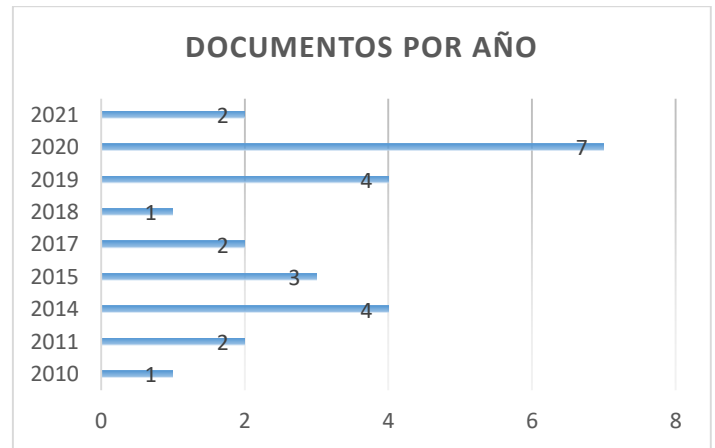
El creciente interés en el modelo Logical Execution Time (LET) es debido a su capacidad para proporcionar un enfoque sistemático y preciso en la gestión de sistemas complejos. Su adopción ha sido impulsada por la necesidad de abordar desafíos específicos relacionados con la sincronización, planificación y coordinación de tareas en entornos donde la concurrencia y la comunicación entre núcleos son fundamentales.

Este aumento significativo en la investigación se muestra en el análisis realizado, en la que se evaluaron 27 documentos desde 2011 a la actualidad en la que destacan investigaciones en contexto de ejecuciones en arquitecturas de sistemas embebidos y múltiples núcleos entre 2019 y 2020

En la Figura 2 se puede apreciar que en 2014 las investigaciones relacionadas a los conceptos relacionados con la comunicación Inter núcleo se

incrementaron, particularmente por la tendencia de investigación enfocada a los modelos basados en intercambio de mensajes.

Figura 2: Distribución de los documentos analizados en el tiempo



Fuente: elaboración propia

Entre 2015 y 2018 se percibe un descenso muy marcado en las investigaciones con la comunicación Inter núcleo, debido a que el intercambio de mensajes, de acuerdo con la literatura consultada, se basa en protocolos de sistemas distribuidos con una naturaleza y necesidades diferentes a las de los sistemas embebidos con múltiples núcleos. A partir de 2019 sin embargo, se vuelve a mostrar un alza en el número de publicaciones, particularmente motivada por la emergencia de diversas alternativas de modelos de comunicación basados en técnicas de distribución temporal, algoritmos heurísticos y modelos de comunicación como el modelo LET, el modelo *Bounded Execution Time* (BET), entre otros. Esto sugiere que el incremento del uso de arquitecturas de múltiples núcleos estimuló la necesidad de encontrar soluciones de intercomunicación entre núcleos embebidos.

**Figura 3:** Frecuencia de aparición de los conceptos de los criterios de búsqueda



Fuente: elaboración propia

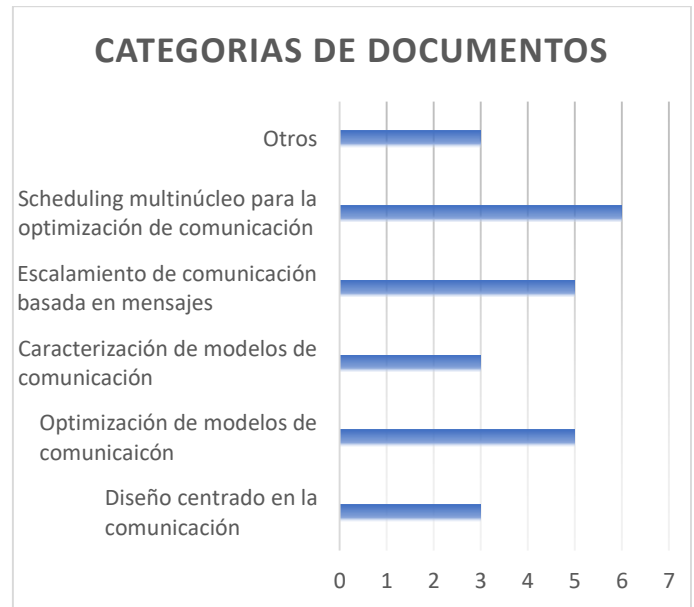
Adicionalmente, se identificaron conceptos comunes entre los documentos seleccionados para este estudio. En la Figura 3 se muestran los seis conceptos que se describen o mencionan con mayor frecuencia en la muestra de documentos.

Después de analizar y caracterizar los documentos de investigación seleccionados, la información fue clasificada en las siguientes categorías:

- Diseño centrado en la comunicación
- Optimización del modelo de comunicación
- Caracterización del modelo de comunicación
- Escalamiento de la comunicación basada en mensajes
- Programación multinúcleo para la optimización de la comunicación

Dichas categorías ayudan a identificar los enfoques desde los cuales se han propuesto soluciones para la problemática de la comunicación entre tareas y entre núcleos de procesamiento embebidos. En la Figura 4 se plasma el número de documentos revisados, en los cuales se identificaron dichas categorías.

**Figura 4:** Frecuencia en las categorías de los artículos analizados



Fuente: elaboración propia

El rango de fechas de publicación mencionado abarca desde 2011 hasta 2021 donde se puede identificar una clara transición en el tema de estudio de cada documento, desde el enfoque de variables compartidas simples, heredado de la comunicación entre tareas, y desde la comunicación a través del paso de mensajes tratando de emular la comunicación en sistemas distribuidos hasta modelos de comunicación que definen las semánticas que son más adecuadas para aplicaciones en tiempo real como la comunicación implícita, BET y LET.

### Análisis y presentación de los resultados

**Tabla 2:** Resultados de las mediciones de cada modelo y su ambiente de prueba

Método/técnica	Ambiente de prueba	Latencia
MSG (MeSsaGe-passing)	PAC Duo (1 ARM926 Core, 2 DSP Cores) 128 KB SRAM, 64 KB LDM, (Hung et al., 2014)	≈ 2900 nS con 64 bytes
MSG (MeSsaGe-passing)	IBM CELL (1 PPC Core, 8 SPE Cores) (Hung et al., 2014)	3000 nS con 16 KB (PPE)

Message Passing - NoC	MPC5777M (3 PPC Cores, 1 lockstep core, 64 KB SPMs) (Tabish et al., 2019)	≈ 0.4s (cadena de 5 tareas)
Comunicación explícita	4 cores @ 200 MHz (Hamann et al., 2017)	≈ 8.6 con tareas de 10 ms
Comunicación implícita	4 cores @ 200 MHz (Hamann et al., 2017)	18.2 mS con tareas de 10 ms
Logical Execution Time	4 cores @ 200 MHz (Hamann et al., 2017)	20 mS con tareas de 10ms
Logical Execution Time	Tri-Core Aurix (Biondi et al., 2017)	11.367 mS

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3 se resumen las ventajas y desventajas sobre las propuestas presentadas, así como la aplicabilidad en sistemas de tiempo real de acuerdo con la información presentada por los distintos autores.

**Tabla 3:** Comparación de características técnicas y modelos de comunicación entre núcleos

Método/técnica	Ventajas	Desventajas
MSG (MeSSaGe-passing)	Independiente de hardware, implementa distintos mecanismos de comunicación.	Alto uso de memoria, mecanismos bloqueantes, no escalable.
Message Passing - NoC	Latencia controlada por accesos a memoria controlados por hardware, menor intervención de software, protección de datos por hardware, escalable.	Dependiente en hardware, imposible de reutilizar entre distintas arquitecturas.
Comunicación explícita	Latencia dependiente del tiempo acceso directo a memoria, sencillez de implementación, independiente de hardware.	Concurrencia de acceso genera inconsistencia e indeterminismo en los datos.

Comunicación implícita	El procesamiento se realiza sobre una copia temporal de los datos. Asegura consistencia de datos. Latencia baja. Independiente de hardware.	Fluctuación en muestreo de datos, escrituras no deterministas, coherencia de datos no está asegurada.
Logical Execution Time	Se elimina fluctuación de muestreo, modelo determinista, coherencia de datos se mantiene, segmentado por funciones.	Latencia dependiente de ciclos de lectura y escritura, así como de sincronización entre núcleos. No resuelve el problema de los traslapes de escritura en sistemas con múltiples núcleos.

Fuente: Elaboración propia

## Discusión y conclusiones

El análisis presentado en este estudio destaca la creciente importancia de la comunicación entre núcleos en sistemas de control automotriz. En la última década, el uso de sistemas en un chip multiprocesador (MPSoC) en aplicaciones de tiempo real, como las unidades de control electrónico (ECU) en vehículos, ha subrayado este interés. Las investigaciones se han enfocado en superar las dificultades observadas en los accesos concurrentes y en asegurar la coherencia de los datos durante el intercambio de información entre núcleos que ejecutan tareas simultáneas. Inicialmente, las soluciones se basaron en métodos diseñados para sistemas distribuidos, pero recientemente han evolucionado hacia modelos específicos para sistemas de tiempo real, posiblemente debido a las exigencias de la industria automotriz en cuanto a determinismo de flujo y baja latencia.

Este estudio también señala un interés creciente en la aplicación del modelo LET (Lenguaje de Ejecución Temporal) en investigaciones y desarrollos automotrices, aunque no es una tecnología nueva. Originario del lenguaje Giotto, desarrollado a principios de la década de 2000, LET se orienta a sistemas de control con requisitos de tiempo real estrictos. Su inclusión en la última versión del estándar AUTOSAR, un referente en la industria automotriz refuerza su relevancia (K. B. Gemlau et al., 2021). A futuro, será interesante ver si emergen nuevas propuestas basadas en métodos y modelos ya



existentes o en enfoques novedosos procedentes de otras aplicaciones.

## Referencias

- Antinyan, V. (2020). Revealing the complexity of automotive software. ESEC/FSE 2020 - Proceedings of the 28th ACM Joint Meeting European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering, 1525–1528. <https://doi.org/10.1145/3368089.3417038>
- Beckert, M. (2019). Scheduling Mechanisms for Efficient and Safe Automotive Systems Integration. <https://doi.org/https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201911070747-5>
- Biondi, A., Pazzaglia, P., Balsini, A., & Natale, M. di. (2017). Logical Execution Time Implementation and Memory Optimization Issues in AUTOSAR Applications for Multicores. 8th International Workshop on Analysis Tools and Methodologies for Embedded and Real-Time Systems (WATERS). <http://retis.sssup.it/~marco/papers/2017/watersch.pdf>
- Buono, D., de Matteis, T., Mencagli, G., & Vanneschi, M. (2014). Optimizing message-passing on multicore architectures using hardware multi-threading. Proceedings - 2014 22nd Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing, PDP 2014, 262–270. <https://doi.org/10.1109/PDP.2014.63>
- Gemlau, K. B., Kohler, L., & Ernst, R. (2021). A Platform Programming Paradigm for Heterogeneous Systems Integration. Proceedings of the IEEE, 109(4), 582–603. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3035874>
- Gemlau, K.-B., Köhler, L., Ernst, R., & Quinton, S. (2020). System-Level Logical Execution Time: Augmenting the Logical Execution Time Paradigm for Distributed Real-Time Automotive Software. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 1(1), 1–27.
- Hamann, A., Dasari, D., Kramer, S., Pressler, M., & Wurst, F. (2017). Communication centric design in complex automotive embedded systems. Leibniz International Proceedings in Informatics, LIPIcs, 76(10), 101–1020. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.ECRTS.2017.10>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Las rutas Cuantitativa Cualitativa y Mixta. In Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. [http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/bitstream/54000/1292/1/Hernández-Metodología de la investigación.pdf](http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/bitstream/54000/1292/1/Hernández-Metodología%20de%20la%20investigación.pdf)
- Hung, S. H., Chiu, P. H., & Shih, C. S. (2012). Building and optimizing a scalable and portable message-passing library for embedded multicore systems. Information, 15(7), 3039–3057. <https://doi.org/10.1145/2103380.210338>
- Hung, S. H., Chiu, P. H., Tu, C. H., Chou, W. T., & Yang, W. L. (2014). Message-passing programming for embedded multicore signal-processing platforms. Journal of Signal Processing Systems, 75(2), 123–139. <https://doi.org/10.1007/s11265-013-0732-8>
- Hung, S. H., Tu, C. H., & Yang, W. L. (2011). A portable, efficient inter-core communication scheme for embedded multicore platforms. Journal of Systems Architecture, 57(2), 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2010.11.003>
- Igarashi, S., Ishigooka, T., Horiguchi, T., Koike, R., & Azumi, T. (2020). Heuristic Contention-Free Scheduling Algorithm for Multi-core Processor using LET Model. Proceedings of the 2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, DS-RT 2020. <https://doi.org/10.1109/DS-RT50469.2020.9213582>
- Jetley, P., & Kale, L. v. (2011). Optimizations for message driven applications on multicore architectures. 18th Annual IEEE International Conference on .... <http://charm.cs.uiuc.edu/newPapers/11-27/paper.pdf>
- Martinez, J., Sañudo, I., & Bertogna, M. (2020). End-to-end latency characterization of task communication models for automotive systems. In Real-Time Systems (Vol. 56, Issue 3). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11241-020-09350-3>
- Masood, S., Khan, S. A., & Hassan, A. (2021). Simulating synchronization issues on a multiprocessor embedded system for testing. 2021 IEEE International Conference on Information Communication and Software Engineering, ICICSE 2021, 299–302. <https://doi.org/10.1109/ICICSE52190.2021.9404126>
- Monot, A., Navet, N., Bavoux, B., & Simonot-Lion, F. (2010). Multicore scheduling in automotive ECUs. Embedded Real Time ..., 2010. <https://hal.inria.fr/inria-00543179>
- Oshana, R. (2019). Embedded Multicore Software Development. In Software Engineering for Embedded Systems (Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809448-8.00010-2>
- Pazzaglia, P., Biondi, A., & di Natale, M. (2019). Optimizing the functional deployment on multicore platforms with logical execution time. Proceedings - Real-Time Systems Symposium, 2019-Decem, 207–219. <https://doi.org/10.1109/RTSS46320.2019.00028>
- Petropoulos, G., & Fenves, G. L. (2010). Interprocessor communication for high performance, explicit time integration. Engineering with Computers, 26(2), 149–157. <https://doi.org/10.1007/s00366-010-0174-x>
- Ritson, C. G., Sampson, A. T., & Barnes, F. R. M. (2012). Multicore scheduling for lightweight communicating processes. Science of Computer Programming, 77(6), 727–740. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2011.04.006>
- Schardl, T. B. (2016). Performance engineering of multicore software : developing a science of fast code for the post-Moore era. [supertech.csail.mit.edu/papers/neboat-phd-thesis.pdf](http://supertech.csail.mit.edu/papers/neboat-phd-thesis.pdf)
- Schoeberl, M., Sorensen, R. B., & Sparso, J. (2015). Models of Communication for Multicore Processors. Proceedings - 2015

IEEE 18th International Symposium on Real-Time Distributed Computing Workshops, ISORCW 2015, 9–16. <https://doi.org/10.1109/ISORCW.2015.57>

Sørensen, R. B., Puffitsch, W., Schoeberl, M., & Sparsø, J. (2015). Message passing on a time-predictable multicore processor. Proceedings - 2015 IEEE 18th International Symposium on Real-Time Distributed Computing, ISORC 2015, 51–59. <https://doi.org/10.1109/ISORC.2015.15>

Tabish, R., Mancuso, R., Wasly, S. et al. A real-time scratchpad-centric OS with predictable inter/intra-core communication for multi-core embedded systems. Real-Time Syst 55, 850–888 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11241-019-09340-0>

Tang, X., Zhai, J., Qian, X., & Chen, W. (2019). PLock: A Fast Lock for Architectures with Explicit Inter-core Message Passing. International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems - ASPLOS, 765–778. <https://doi.org/10.1145/3297858.3304030>

Toscanelli, M. (2019). Multicore Software Development for Engine Control Units. [https://amslaurea.unibo.it/19281/1/Tesi\\_Massimo\\_Toscanelli.pdf](https://amslaurea.unibo.it/19281/1/Tesi_Massimo_Toscanelli.pdf)

Urbina, M. (2020). TIMEA : Time-Triggered Message-based Multicore Architecture for AUTOSAR.

Waldherr, S., Knust, S., & Aust, S. (2015). Message scheduling for real-time interprocessor communication. Journal of Systems Architecture, 61(8), 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2015.06.002>

# Desarrollo y validación de una alternativa natural a glifosato

Adrián Esteban Ortega-Torres<sup>1</sup>, Elsy Ruby García-Cervantes<sup>2</sup>, Diana Victoria Melo-Sabogal<sup>1</sup>, Carlos Alberto Cruz-Ferrer<sup>2</sup>, Diana Alonso Segura<sup>2\*</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala. Carr. Chichimequillas, s/n km 1.

<sup>2</sup> Academia de Química y Biotecnología, Universidad Tecnológica de Corregidora, Carr. Santa Bárbara-Coroneo km 11.2. \*[diana.alonso@utcorregidora.edu.mx](mailto:diana.alonso@utcorregidora.edu.mx)

## Resumen

En este trabajo se formularon cinco emulsiones con ácido acético o ácido cítrico, limoneno y quitosano a fin de obtener propiedades herbicidas naturales que sean una alternativa al uso de glifosato. Esto se evaluó en modelos vegetales *in vitro*, *in vivo* [semillas de *Medicago sativa* (alfalfa), *Petroselinum sativum* var. *latifolium* (perejil liso) y *Dysphania ambrosioides* (epazote) y plántulas de *Solanum lycopersimum* (jitomate), *Cucumis sativus* (pepino), plantas de *Ocimum basilicum* (albahaca) y *Capsicum annuum* L. (chile serrano)] e *in situ* (plantas silvestres) para determinar la eficacia de ésta con respecto a su posible uso como sustituto de glifosato (agroquímico usado para eliminar malas hierbas o herbáceas indeseables). Dentro de los resultados obtenidos se tuvo una pronta y adecuada acción herbicida *in vitro* sobre el 100% de las especies de semillas, *in vivo* con un 98% de las plántulas y plantas evaluadas al usar la emulsión compuesta de 5% v/v de limoneno y 5% p/v ácido cítrico, dicha formulación fue llevada a campo para su validación y se observó inhibición y daño en especies silvestres; paralelamente se evaluó el nivel de bioseguridad de las emulsiones por medio de ensayos de viabilidad celular por el método de resazurina, los datos fueron estudiados por medio de un análisis estadístico de ajuste Anderson-Darling y Anova  $P > 0.05$  de dos factores para determinar diferencias significativas entre los resultados, obteniendo una viabilidad celular mayor al 75%, con una de las emulsiones, por lo que ésta se puede clasificar por medio de la norma ISO 10993 como no tóxica.

**Palabras clave:** Emulsión, herbicida, glifosato, no- toxicidad

## Abstract

In this work, five emulsions were formulated with acetic acid or citric acid, limonene and chitosan in order to obtain herbicidal properties. This was evaluated *in vitro*, *in vivo* [*Medicago sativa* (alfalfa) seeds, *Petroselinum sativum* var. *latifolium* (smooth parsley) and *Dysphania ambrosioides* (epazote) and seedlings of *Solanum lycopersimum* (tomato), *Cucumis sativus* (cucumber), *Ocimum basilicum* (basil) and *Capsicum annuum* L. (serrano chili)] and *in situ* (wild plants) to determine its effectiveness with respect to its possible use as a substitute for glyphosate (agrochemical used to eliminate weeds or undesirable herbaceous plants). Among the results obtained, there was a prompt and adequate herbicidal action *in vitro* on 100% of the seed species and *in vivo* with 98% of the seedlings and plants evaluated when using the emulsion composed of 5% v/v limonene and 5% w/v citric acid, said formulation was taken to the plot for validation in field and inhibition as well as damage was observed in wild species; at the same time, the biosafety level of the series of emulsions was evaluated by means of cell viability tests using the resazurin method, obtained data were studied by means of a statistical analysis of Anderson-Darling adjustment and Anova  $P > 0.05$  of two factors to determine Significant differences between the results, obtaining a cell viability greater than 75%, with one of the emulsions, so it can be classified by means of the ISO 10993 standard as non-toxic.

**Key words:** Emulsion, glyphosate, herbicide, non-toxic.

Artículo arbitrado

Recibido:

16 de febrero de 2024

Aceptado:

14 de marzo de 2024

## Introducción:

Dentro de los retos en el desarrollo agroalimentario está la productividad para mantener la seguridad alimentaria, debido a ello es necesario aumentar la producción de alimentos en 70 %; la agricultura en los países en desarrollo casi tendría que duplicarse. Por lo que han sido sujeto de estudio los factores que alteran la agricultura, dentro de éstas se encuentra la salinidad de suelo, falta de agua, nutrientes, fotoperiodo y competencia entre otras plantas; algunas de estas plantas son denominadas arvenses o hierbas malas, ya que compiten por agua y nutrientes con plantas de cultivos de interés comercial. La forma de control de arvenseses con herbicidas químicos permite la inhibición o evita el crecimiento, en este sentido el glifosato o N-(fosfometil) glicina es uno de los más empleados.

El glifosato es un compuesto organofosforado de amplio espectro de acción foliar que entra por las hojas y se disemina por la planta inhibiendo la síntesis de algunos aminoácidos, a nivel mundial fue utilizado con casi 747 millones de toneladas durante el 2014, por lo que representa el 72% de los herbicidas usados a nivel mundial (Klingelhöfer et al., 2021; SEMARNAT, 2018).

Por otro lado, se han visto efectos negativos por el empleo de éste herbicida, afectando la sostenibilidad de ecosistemas acuáticos, de aire y en suelo e incluso en la salud de los usuarios provocando dificultad para respirar, falla renal, linfoma no Hodgkin, malformaciones congénitas, infertilidad, aumento del riesgo de mieloma múltiple, diabetes, aterosclerosis y alteraciones del sistema nervioso central (Sierra et al., 2021).

Debido a esto y al decreto nacional del 2020 (DOF), en este trabajo se formularon emulsiones con limoneno, ya que éste ha demostrado ser un potencial fitotóxico de amplio espectro (Getty et al., 2022). Este monoterpeno ha sido evaluado contra la germinación de semillas y ha impedido el crecimiento radicular de varias especies, entre ellas, berro de jardín (*Lepidium sativum* L.); también ha inhibido el crecimiento de plantas de *Arabidopsis* con mayor eficiencia que otros monoterpenos como citral, carvacrol y pulegona (Ibañez et al., 2020). El mecanismo de acción del limoneno sobre arvenses aún no está bien definido, sin

embargo, su efecto depende no sólo del arvense a inhibir sino también de la concentración en la que se use, así como su fuente de obtención.

Por otro lado, el uso de ácidos orgánicos (acético o cítrico) con quitosano; favorecen la elaboración y la estabilidad de una emulsión, ya que una emulsión es una mezcla de líquidos inmiscibles de forma más o menos homogénea, y el uso de un biopolímero permite la formación de microcápsulas dispersas homogéneamente en fase acuosa, así la microcápsula está compuesta por dos elementos, un núcleo (sustancia activa) y un delgado armazón polimérico (quitosano) teniendo así una sustancia herbicida, suspendida en otra sustancia, logrando gracias a las propiedades del polímero, una liberación gradual de los agentes activos (Alonso et al., 2022). Además el ácido acético ha demostrado tener actividad herbicida, no selectivo y se ha utilizado desde hace más de dos décadas para el control de arvenses en jardines caseros y decorativos, aplicado sólo o en mezcla con algún aceite esencial. En este sentido se ha reportado que su mecanismo de acción es destruyendo la membrana celular provocando desecación de la planta y eventualmente su muerte (Webber III et al., 2018).

Por todo lo anterior el objetivo de este trabajo fue desarrollar y validar una emulsión herbicida usando ingredientes naturales y determinar el nivel de citotoxicidad, para así contar con alternativas al glifosato.

## Métodos:

### 1. Prueba in vitro de las emulsiones en la germinación de herbáceas.

En zona estéril y aséptica, se seleccionaron 30 semillas (por especie) de: *Medicago sativa* (alfalfa), *Petroselinum sativum* var. *latifolium* (perejil liso) y *Dysphania ambrosioides* (epazote), todas de la marca Rancho los Molinos (VitaFlor, Morelos, México), se colocaron 10 semillas por almohadilla de algodón en cajas Petri estériles. Posteriormente, se aplicaron 2 mL de emulsión (tiempo cero) cuyas concentraciones de los ingredientes de cada formulación se describen en la tabla 1; estas emulsiones se elaboraron de acuerdo a lo reportado por Alonso-Segura et al (2022). Como

controles se utilizaron agua destilada (AD) y glifosato (Gl) (Nivela 480, FMC Agroquímicos de México, S. de R.L de C.V.) en una concentración de 2.5% v/v. Cada evaluación se realizó por triplicado.

**Tabla 1.** Concentraciones de las emulsiones en la investigación.

Emulsión	Limóneno	Ácido acético	Ácido cítrico
E1	10%	5%	-
E2	7.5%	2.5%	-
E3	5%	1.25%	-
E4	5%	-	5%
E5	2.5%	-	5%

Éstos se mantuvieron en una cámara de crecimiento vegetal (Thermo Scientific, Waltham, Massachusetts), a  $17 \pm 1$  °C, con exposición a la luz de 12 horas y 50% de humedad, regando cada 2 días con 2 mL de agua de grifo, la prueba se monitorea por 30 días. Una vez observado el brote de la plúmula, ésta se midió con un Vernier; para determinar el porcentaje de inhibición, se utilizó la siguiente ecuación (Ec.1):

$$\% \text{ Inhibición de Germinación} = (100 - \frac{\text{semillas germinadas tratamiento}}{\text{semillas germinadas del control}}) * 100\%$$

(Ec. 1)

## 2. Prueba in vivo de las emulsión en plántulas y plantas.

La prueba en plántulas de *Solanum lycopersimum* (jitomate) y *Cucumis sativus* (pepino) y en plantas de *Ocimum basilicum* (albahaca) y *Capsicum annum L.* (chile serrano), con las emulsiones descritas en la tabla 1, se realizó aplicando 2 mL de la respectiva emulsión y control de AD y de Gl (2.5%v/v). El experimento se hizo por cuadruplicado para mantener la reproducibilidad. Para determinar el tiempo y

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{[\text{Plantas control} - \text{plantas trat.}] * 100}{\text{Plantas control}}$$

(Ec. 2)

número de plantas sobrevivientes se utilizó la siguiente ecuación (Ec. 2):

Se mantuvo el crecimiento de las plantas, para la albahaca hasta contar con 10 hojas verdaderas, y en chile hasta su primera floración. Se seleccionaron aleatoriamente 15 plantas de albahaca de un total de 34, a las cuales se les aplicó la emulsión, mientras que el resto fueron evaluadas con un control de AD y de Gl al 2.5%v/v. Las plantas de chile fueron seleccionadas aleatoriamente 4, para la aplicación de la emulsión, y 4 como control con AD, otras 4 con Gl al 2.5% v/v. Las mediciones de grosor del tallo, altura del tallo y número de hojas se realizaron diariamente durante 28 días, para ambas especies. Se estimó la varianza de los datos de las plantas mediante la distribución de Fisher con 90% de confianza.

## 3. Evaluación de la emulsión con ácido cítrico en campo.

Para la evaluación en campo se seleccionó la emulsión con mayor efecto de las 2 metodologías previas (2 y 3) cuya formulación se describe en la tabla 1; y el control positivo fue el uso de glifosato.. El área a tratar se ubica en la localidad de Amazcala, municipio Del Márques, Querétaro, México. El área se dividió en 4 cuadrantes de 1.5 m<sup>2</sup>, donde se aplicó 1 L de tratamiento por cuadrante mediante aspersión, con ayuda de un rociador a presión manual (Truper, S.A. de C.V., México), a las 9:00 am, a una temperatura ambiental de  $18 \pm 2$  °C, misma que se mantuvo durante las 3 semanas siguientes, en ese horario. Los arvenses presentes en cada cuadrante se describen en la tabla 2, se evaluó la severidad del efecto de la emulsión, en un rango del 1-5, donde 1 es vivo y 5 es muerte.

**Tabla 2.** Arvenses identificadas en la parcela demostrativa..

Arvense	Caracts.
Pasto “pegarropa”	Alta, delgada, larga con punta tipo cadillo que se pega en la ropa.
Pasto punta estrella (Jhonson)	Larga, que termina con una tipoestrella de tres puntas.
Pasto 3	tipo <i>Lolium</i> .

Pasto 4	tipo <i>Vicia sativa</i> .
Pasto 5	Largo con textura tipo suculenta.
Maleza larga.	Larga tipo enredadera y con flor blanca.
Maleza algodóncillo	Con algodóncillo y con semilla tipovaina.
Maleza morada	Tipo enredadera con flor morada.
Arbusto	Tronco marrón-rojizo, con hojas grandes y semillas cubiertas con espinas.

la determinación de toxicidad a 24 h a 37 °C y 5% de CO<sub>2</sub>. Cada tratamiento y control se inoculó con 30 µL de la concentración de CMN, los tratamientos E1, E3 y E5 consistieron en volúmenes de 2, 4, 6, 8 y 10 µL, de medio RPMI. El control positivo contenía 5µL de Trizol, 55 µL de medio RPMI y los 30 µL de CMN; el control negativo, contenía 60 µL de medio RPMI y 30 µL de CMN. Cada dos horas antes de cada lectura, se añadieron 10µL de rezarzurina (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania), se analizaron a 530 nm<sub>ex</sub> y 590 nm<sub>em</sub>, obteniendo fluorescencia y de esto se determinó la viabilidad celular.

## Resultados:

### 4. Determinación de la toxicidad a nivel celular de las emulsiones.

Para los ensayos de viabilidad celular se procedió según la metodología modificada en el laboratorio de ecotoxicología del CIACyT, SLP, México.

#### 4.1 Células mononucleares (CMN) de sangre periférica.

Se realizó una punción venosa a individuos en buen estado de salud de entre 20 a 40 años; para la punción se utilizó un sistema vacutainer, se recolectaron 2 tubos de 4 mL por muestreo, cada tubo contenía anticoagulante EDTA. En los tubos obtenidos se separaron las CMN con 3 mL de reactivo Ficoll (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania), mediante la técnica de Ficoll-hypaque y se centrifugó a 2500 rpm por 20 min. Después se extrajo el paquete de CMN (linfocitos y monocitos) del plasma sanguíneo, se procedió a un lavado con buffer PBS (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania) en centrifuga a 1500 rpm por 10 minutos, se desechó el sobrenadante y el pellet se suspendió nuevamente en 1mL de medio celular RPMI (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania). Por último, se realizó una dilución 1:20 de CMN y reactivo Turck (Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemania), se realizó la cuenta celular en cámara de Neubauer, se ajustó el volumen con medio RPMI, hasta obtener una concentración de  $1 \times 10^6$  CMN/mL.

#### 4.2 CMN viables expuestos a la emulsión.

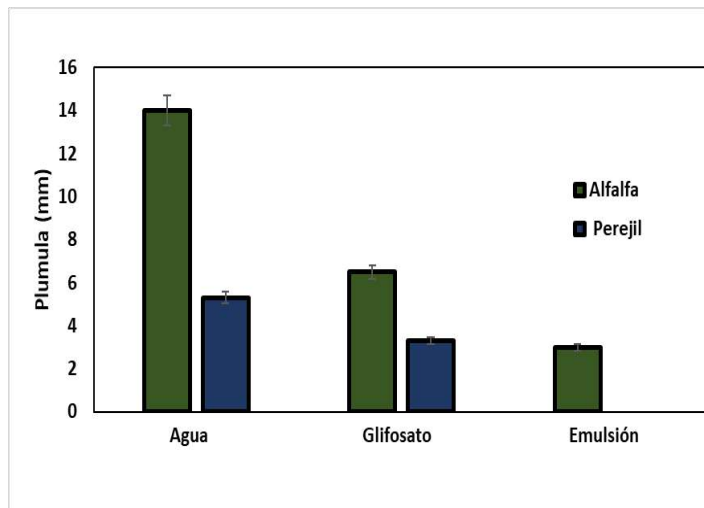
La prueba se realizó en microplacas de 96 pozos para

### 1. Evaluación in vitro del efecto inhibitorio de la emulsión a base de ácido acético o ácido cítrico y limoneno en la germinación de herbáceas.

Se logró una inhibición al 100% con las emulsiones 1, 2 y 3 en la germinación de especies de arvenses comerciales: alfalfa (*Medicago sativa*), perejil liso (*Petroselinum sativum* var. *Latifolium*) y epazote (*Dysphania ambrosioides*), estas especies vegetales se utilizaron debido a que se producen en campo y en un huerto de la Universidad Autónoma de Querétaro, donde regularmente se le aplica herbicida para el control de las malezas. Por otro lado, al evaluar la emulsión 4 sobre semillas de alfalfa se obtuvo una mayor inhibición de la germinación de éstas, con respecto al control de glifosato al 2.5%v/v, como se observa en el Gráfico 1.

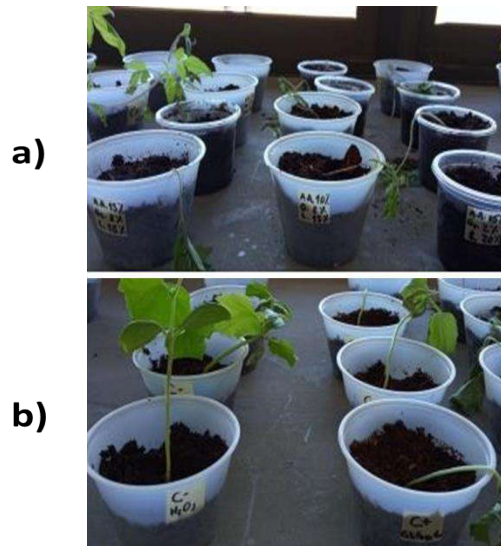
En el gráfico 1 se muestra que no hubo germinación, 0% de semillas germinadas, de las semillas de perejil, es decir se obtuvo un 100% de inhibición, en comparación con el grupo de semillas que se trataron con glifosato, éste sí permitió la germinación de ésta especie; del análisis estadístico de estos resultados se obtuvo una diferencia significativa entre los 3 grupos (dos controles y emulsión, gráfico 1); mientras que con las semillas de epazote, se obtuvo un 100% de inhibición tanto con la emulsión como con el glifosato, lo que no se presenta gráfico.

**Grafico 1.** Comparación en la germinación a 30 días



## 2. Evaluación *in vivo* del efecto herbicida en plántulas y en plantas.

Estas especies vegetales se escogieron para evaluar el efecto en las plantas de valor comercial y productivo del país. Del ensayo con plántulas de pepino (*Cucumis sativus*), se observó muerte del 100% de los especímenes en menos de 24 h al aplicar las emulsiones 1-3 (Fig. 1). Debido a ello y a los resultados descritos en la sección 1, se descartaron todas las formulaciones con ácido acético y se decidió utilizar la emulsión 4 y 5, únicamente, para su validación *in vivo* con los especímenes de albahaca, teniendo al igual que en los experimentos previos los controles positivo y negativo, de AD y GI al 2.5% v/v.



**Figura 1.** Ensayo de emulsiones con plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) 24 hrs de la aplicación. a) Plántulas con aplicación de emulsión. b) Plántulas control negativo (agua destilada) y positivo (glifosato) a las 24h.

Así de las mediciones se realizó el análisis estadístico, Turkey-Kramer, y lo que se obtuvo se presenta en las tablas 3 y 4.

**Tabla 3.** Informe del análisis estadístico de la planta de albahaca (*Ocimum basilicum*).

Medidas plantas	Nivel		Media	Razón F	Prob > F
Grosor de tallo (mm)	Sin emulsión	A	2.19	1.03	0.3128
	Emulsión 5	A	2.13		
Altura de tallo (cm)	Sin emulsión	A	10.44	1.7970	0.1962
	Emulsión 5	A	9.45		

**Tabla 4.** Informe estadístico de la planta de chile serrano (*Capsicum annuum* L.)

Medidas plantas	Nivel		Media	Desv. Stnd
Grosor de tallo (mm)	Agua	A	2.175	0.2992
	Glifosato 2.5%	B	1.175	1.1853
	Emulsión 5	B	1.475	0.9543
Altura de tallo (cm)	Agua	A	9.187	2.1682
	Glifosato 2.5%	B	8.75	6.0289
	Emulsión 5	B	8.125	8.9744

Con esto se observa que la emulsión 5 tuvo efecto equivalente al glifosato, por lo que resultó ésta emulsión la adecuada para ser validada posteriormente con las plantas de chile. Una vez finalizado el experimento, se midieron las raíces y algunas plantas se presentan en la figura 2, donde se observa que las plantas tratadas con la emulsión 5, presentan hojas oxidadas y decaídas, tallos amarillentos y raíces aglomeradas; mientras que las plantas sin ningún tratamiento se observaron más verdes con los tallos más firmes y las raíces ligeramente extendidas.

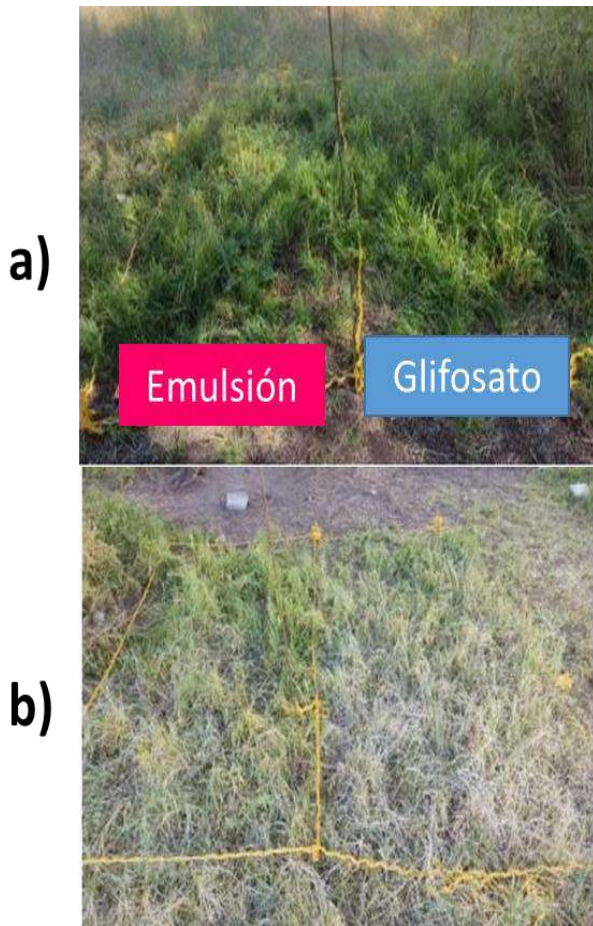
**Figura 2.** Plantas de albahaca (*Ocimum basilicum*) al final del experimento.

Posteriormente se aplicó esta emulsión, en plantas de chile, siendo evidente la similitud del efecto de ésta y del efecto del glifosato, ambos grupos de plantas inicialmente perdieron sus hojas, el tallo se oxidó y secó; sin embargo a diferencia del glifosato, pasadas 3 semanas de la aplicación y presenciado el daño, las plantas de chile del grupo tratado con la emulsión, comenzaron a reverdecir, mientras que las de glifosato estaban totalmente muertas; confirmando así que la emulsión 5 sería la adecuada para ser aplicada en campo.

### 3. Evaluación de la emulsión en campo

Debido a los resultados obtenidos de la emulsión 5, descritos previamente, ésta se aplicó en campo; previo al tratamiento se observaron las especies en estado 1 de salud (verdes y frescas) de acuerdo con la descripción de la metodología, y como se observan en la figura 3.





**Figura 3.** Cuadrantes de pruebas en campo de arvenses. a) Antes de la aplicación. b) 48 hrs después de la aplicación.

En la tabla 5 se describen los resultados obtenidos tras 48 h de haber aplicado la emulsión en campo y su relación de los especímenes con la descripción del daño sufrido de acuerdo con las tablas 2 y 3. Se notó un pardeamiento u oxidación de las hierbas, figura 4, en unas especies más que en otras como se detalla en la tabla 5, se indica el daño observado por especie, reportando aleatoriamente 3 áreas de 30cm<sup>2</sup> de cada cuadrante.

**Tabla 5. Descripción del daño en en campo.**

Cuadrante	Tipo de Arvense	Tratamiento	Nivel de daño
1	Pega ropa	Emulsión	3
		Glifosato	1
	Pega ropa	Emulsión	2
		Glifosato	1
	Pega ropa	Emulsión	3
	Pasto largo	Glifosato	2
2	Pasto estrella	Emulsión	2
	Pega ropa	Glifosato	1
	Pasto estrella	Emulsión	4
	Pasto largo	Glifosato	2
	Pega ropa	Emulsión	4
	Pasto largo	Glifosato	1
3	Pasto Estrella	Emulsión	4
	Pega ropa	Glifosato	1
	Pega ropa	Emulsión	4
	Pasto 4	Glifosato	2
	Pasto 3	Emulsión	4
	Pasto estrella	Glifosato	2
4	Pasto estrella	Emulsión	3
	Pega ropa	Glifosato	2
	Pasto 4	Emulsión	3
	Pasto 3	Glifosato	2
	Pega ropa	Emulsión	3
	Pasto 4	Glifosato	2

#### 4. Determinación de la toxicidad a nivel celular de las emulsiones.

La viabilidad celular fue inversamente proporcional a la concentración del ácido orgánico que contenían las emulsiones evaluadas, se observó que la E1 presentó mayor citotoxicidad, teniendo menos del 75% de viables posterior a las 24 horas, por otro lado, la E3 presentó únicamente un valor mayor al 75% de viables con 2µL (87.4%) mientras que con la E5 al aplicar 2µL de emulsión se obtuvo un 100% de viables, con 4µL (86.2%) y con 6µL (77.8% de viables) y con 8µL (67.4% viables). La citotoxicidad aumentó cuando se usó emulsión con ácido acético; esto demuestra diferencia citotóxica entre el uso de ácido acético o ácido cítrico, así como a la reportada por el glifosato comercial el cual tiene una concentración letal 50 de 56.4µg/mL comparada con la de la E3 que es de 100µL/mL en 34 células mononucleares, mientras que en linfocitos provenientes de humanos se tiene una concentración letal 50 promedio de 63.04 y 58.69µg/mL en ensayos de exclusión celular con azul de tripano y ensayo con sulfurodamina B respectivamente (Almeida, 2018).

#### Conclusiones:

Dentro de las formulaciones de las emulsiones con ácido acético como fase continua, hubo inhibición con todas las concentraciones usadas, sin tener diferencia significativa con respecto al porcentaje de fase dispersa (limoneno) en todos los ensayos *in vitro* con semillas realizados; mientras que en los ensayos *in vitro* en CMN, se concluye que la viabilidad celular está relacionada con el volumen de ácido acético encontrado en la emulsión como con el volumen/dosis de exposición a la célula, se recomienda continuar con el estudio de estos tratamientos variando la metodología de citotoxicidad utilizada, obteniendo un número de muestras representativo de una población y tratar cultivos de células inmortalizadas con el fin de adquirir entendimiento de la viabilidad a un periodo de exposición mayor. Por otro lado, con la emulsión de ácido cítrico (5%) como fase continua, se vio que la formulación de 5% de limoneno (emulsión 4) mostró resultados esperados dentro del uso en semillas y plántulas al generar un efecto equivalente

al glifosato *in vitro*, además de mostrar un daño de nivel 3 y 4 en su mayoría sobre los pastos denominados estrella y pegarropa en campo experimental. En contraste con la formulación de 2.5% de limoneno (emulsión 5), resultando ésta además no tóxica de acuerdo con la norma ISO 10993. Se infiere entonces que la acción de herbicida es proporcional a la concentración de limoneno dentro de la emulsión con ácido cítrico.

#### Bibliografía:

Almeida, B. F. (2018). Efecto citotóxico y genotóxico del glifosato en formulación Roundup sobre linfocitos humanos. [Proyecto de Investigación, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. Repositorio Institucional UNAD.

Alonso-Segura, D., Hernández-Pimentel, V.M., Melo-Sabogal, D.V., Sánchez-García, E. N., Domínguez-Alfaro, E. M., Aguilar-Fernández, D. Y., Hernández-Solis, E. L., Ojeda-Rodríguez, D., Contreras-Morales, E. & Cruz-Ferrer., C. A. (2022). Desarrollo y validación de una serie de actividades agroecológicas y biotecnológicas que favorecen la producción libre de agroquímicos tóxicos en cultivos de vid (*Vitis vinifera*) de la región Bajío. Reporte final-316007, CONACYT, México.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2022). DECRETO por el que se establecen las acciones que deberán realizar las dependencias y entidades que integran la Administración Pública Federal, en el ámbito de sus competencias, para sustituir gradualmente el uso, adquisición, distribución, promoción e importación de la sustancia química denominada glifosato y de los agroquímicos utilizados en nuestro país que lo contienen como ingrediente activo, por alternativas sostenibles y culturalmente adecuadas, que permitan mantener la producción y resulten seguras para la salud humana, la diversidad biocultural del país y el ambiente. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5609365&fecha=31/12/2020#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609365&fecha=31/12/2020#gsc.tab=0)

García Cervantes, E.R., Ramírez Rivera, A.G., Alonso Segura, D. (2022). Control de germinación de semillas y plántulas de herbáceas con un sustituto orgánico al glifosato. Memoria para la obtención del grado de Técnico Superior Universitario en Química, Universidad Tecnológica de Corregidora, México.

Gettys, L. A., Thayer, K. L., & Sigmon, J. W. (2022). Phytotoxic Effects of Acetic Acid and d-limonene on Four Aquatic Plants. *HortTechnology*, 32(2), 110-118. Retrieved Sep 11, 2023, from <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04986-21>

Ibáñez, M. D., Sanchez-Ballester, N. M., & Blázquez, M. A. (2020). Encapsulated limonene: A pleasant lemon-like aroma with promising application in the agri-food industry. A review. *Molecules*, 25(11), 2598. [doi.org/10.3390/molecules25112598](https://doi.org/10.3390/molecules25112598)

Klingelhöfer, D., Braun, M., Brüggmann, D., & Groneberg, D. A. (2021). Glyphosate: How do ongoing controversies, market characteristics, and

funding influence the global research landscape? *Science of The Total Environment*, 765, 144271. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.1442

Semarnat, Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (2018): El herbicida glifosato y su uso en la agricultura con organismos genéticamente modificados (En línea) [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/425676/Informe\\_Glifosato\\_Agricultura\\_OGMs\\_24.12.2018\\_agg.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/425676/Informe_Glifosato_Agricultura_OGMs_24.12.2018_agg.pdf)

Sierra, R. H., Luzón, D. G., & Zepeda, H. R. (2021). Uso del glifosato en México. *Revista Iberoamericana de Bioética*, (17).

Webber III, C. L., White Jr, P. M., Shrefler, J. W., & Spaunhorst, D. J. (2018). Impact of acetic acid concentration, application volume, and adjuvants on weed control efficacy. *Journal of Agricultural Science*, 10(8). doi:10.5539/jas.v10n8p

# Análisis y Simulación de Pulso Trapezoidal de Corriente – Voltaje por Medio de Redes Formadoras

Daniel Hernández Arriaga<sup>1</sup>, Cyntia Rocío Flores Juárez<sup>2</sup>, Isaac Hernández Arriaga<sup>3</sup>, Miguel Ángel González Ortíz<sup>1</sup>, Rodrigo Rodríguez Rubio<sup>1</sup>, Miguel Ángel Ramírez Reséndiz<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo Col. Centro, CP 76000, Querétaro, Qro. México.

<sup>2</sup>División Industrial Área de Nanotecnología, Universidad Tecnológica de Querétaro, C.P. 76148 Querétaro, Qro., México.

<sup>3</sup>Departamento de Metal Mecánica, Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo Col. Centro, CP 76000, Querétaro, Qro. México.

Correspondencia: [daniel.ha@queretaro.tecnm.mx](mailto:daniel.ha@queretaro.tecnm.mx)

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de redes formadoras de pulso considerando modelos de A. E. Guillemin para un pulso de corriente – voltaje con las características definidas de forma trapezoidal, magnitud y tiempo de duración. Una red formadora de pulso es un circuito eléctrico en configuración particular, estas se forman de capacitores e inductores. Las aplicaciones de estos pulsos de corriente se utilizan para controlar la contaminación orgánica en alimentos, agua, aplicaciones de radar y en investigación de los reactores de fusión nuclear del tipo Tokamak para la generación del campo magnético toroidal, debido a que el campo magnético requerido es proporcional a la corriente que lo genera entre otros. Se desarrolló una corrida de programación en MATLAB<sup>®</sup> para el cálculo de los parámetros y se armaron circuitos en el programa ATP para ver su resultado en simulación en estado transitorio de la corriente – voltaje en una carga puramente resistiva. Dependiendo de la aplicación del pulso se puede utilizar por ejemplo la ventaja que tiene la Red tipo E, debido a que todos los capacitores son de valores iguales como se ve en la simulación, o si es importante la aproximación de la forma de onda de corriente – voltaje puede ser la Red tipo C como se observa en la tabla de valores y simulación.

**Palabras clave:** ATP – Alternative Transient Program, RFP – Red Formadora de Pulsos.

## Abstract

This paper presents the design of pulse – forming networks considering A. E. Guillemin models for a current – voltage pulse with the defined characteristics of: trapezoidal shape, magnitude and time duration. A pulse forming network is an electrical circuit in a particular configuration, these are made up of capacitors and inductors. The applications of these current pulses are used to control organic contamination in food, water, radar applications and in research on tokamak type nuclear fusion reactors for the generation of the toroidal magnetic field, because the required magnetic field is proportional to the current that generates it among others. A file was developed in MATLAB<sup>®</sup> to calculate the parameters and circuits were built in the ATP program to see their result in simulation in a transient state of the current - voltage in a purely resistive load. Depending on the application of the pulse, for example, the advantage that the Type E Network has, because all the capacitors are of equal values as seen in the simulation, or if the approximation of the current – voltage waveform is important. The voltage can be Network Type C as observed in the value table and simulation.

**Keywords:** ATP – Alternative Transient Program, PFN – Pulse Forming Network.

---

Artículo arbitrado

Recibido:

Aceptado:

16 de febrero de 2024

12 de marzo de 2024

## Introducción

En las aplicaciones de potencia pulsada donde una magnitud de corriente o voltaje constante a una carga se transfiere en un intervalo de tiempo, las redes formadoras de pulso se utilizan ampliamente debido a sus requisitos comparados con elementos electrónicos de potencia, principalmente por la utilización de elementos almacenadores de energía. La potencia eléctrica almacenada en capacitores e inductores, por medio de voltaje y corriente de la fuente de alimentación y circuitos resonantes en configuraciones particulares  $L-C$  según la solución eléctrica – matemática se presentan para la generación de pulsos de corriente. La combinación de elementos en segmentos de  $L-C$  por etapa, permite el control de la salida de potencia. Particularmente es importante la contribución de las redes Guillemín por su contribución en el análisis y diseño de estas, las cuales se diseñan a partir del análisis de Fourier para producir pulsos de corriente – voltaje de forma parabólica, rectangular y trapezoidal (Wengang, S., Lijun, et al., 2020).

En este trabajo, se realizó una corrida de programación en el software MATLAB® para calcular los valores de los elementos que forman parte y posteriormente se armaron los circuitos eléctricos en el programa ATP, para evaluar en estado transitorio considerando una carga puramente resistiva.

En los casos de análisis y simulación que se presentan en este trabajo se evaluaron las redes con el siguiente orden de acuerdo a su configuración resultante, la Red Formadora de Pulsos tipo A, B, C, D y E, estas se consideran 5 etapas de conexión de los capacitores e inductores, el pulso de corriente – voltaje generados a una carga.

Se considera como ejemplo un pulso de una magnitud de corriente 100 A y voltaje de 100V, un tiempo de duración de 10 ms y una resistencia de carga de  $1\Omega$ .

## Método

*Teoría de Guillemín y diseño de Redes Formadoras de Pulso de Corriente – Voltaje*

Los diseños de las redes formadoras de pulso se basan en la naturaleza de las pérdidas en líneas de transmisión. Una condición al utilizar esta teoría es que en el pulso se generan oscilaciones en la parte plana de esta. Guillemín diagnosticó esta condición utilizando elementos de parámetros – concentrados en la red. De tal forma que el pulso rectangular ideal generado por esta teoría tiene tasa finita de subida y bajada en el pulso. Guillemín argumenta que no es posible generar un pulso ideal utilizando elementos de parámetros – concentrados. Matemáticamente, ésta condición significa que la discontinuidad en la forma del pulso es eliminada, y que las series de Fourier para la Red Formadora de Pulsos – C tiene la propiedad de convergencia uniforme. Esta propiedad asegura que las oscilaciones en el pulso se pueden reducir en un grado deseado usando suficientes secciones de etapas. La forma de determinar la función de impedancia es el utilizar el circuito básico de línea y trabajar en la forma del pulso. El diagrama del circuito eléctrico se muestra en la figura 1.

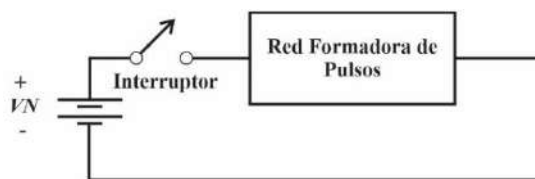
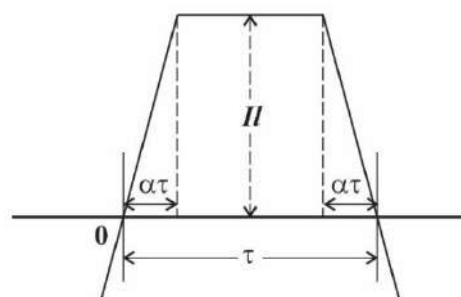


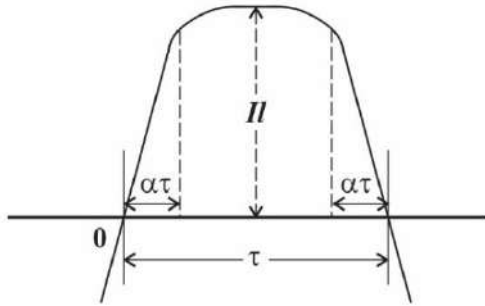
Figura 1. Circuito eléctrico de configuración de una RFP conectada.

La forma de onda de corriente producida es a la forma de pulso deseado (trapezoidal, parabólico y rectangular).

Dos de las aportaciones originales de Guillemín se muestran en la figura 2a y 2b.



a) Pulso trapezoidal



b) Pulso trapezoidal con superficie plana, ascenso y descenso parabólico.

Figura 2. Pulso trapezoidal propuesta por Guillemín.

El porcentaje creciente en la onda que se muestra en la figura 2b, se forma por un intervalo parabólico y la parte plana de esta; la parte decreciente es similar, pero de forma invertida. La ecuación para esta elevación parabólica es:

$$\frac{i(t)}{I_l} = 2 \frac{t}{\alpha\tau} - \frac{t^2}{\alpha^2\tau^2}$$

Las series de Fourier para este tipo de ondas se describen por los siguientes métodos:

Caso 1. *Onda Trapezoidal*. Como  $i(t)$  es una función impar, la serie solo contiene términos seno, y no hay términos constantes. Así

$$i(t) = I_l \sum_{v=1}^{\infty} b_v \sin \frac{v\pi t}{\tau} \quad (1)$$

donde

$$b_v = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{i(t)}{I_l} \sin \frac{v\pi t}{\tau} dt$$

e  $i(t)$  se define por las ecuaciones

$$\frac{i(t)}{I_l} = \begin{cases} \frac{t}{\alpha\tau} & 0 \leq t \leq \alpha\tau \\ 1 & \alpha\tau \leq t \leq \tau - \alpha\tau \\ \frac{\tau - t}{\alpha\tau} & \tau - \alpha\tau \leq t \leq \tau \end{cases}$$

Las integraciones son con respecto a  $b_v$ , se tiene

$$b_v = \frac{4}{v\pi} \frac{\sin v\pi\alpha}{v\pi\alpha}$$

donde

$$v = 1, 3, 5, \dots$$

Caso 2. *Onda con forma superior plana y ascenso y descenso parabólico*. Nuevamente  $i(t)$  es una función impar, solo términos seno en la serie de Fourier. Así

$$i(t) = I_l \sum_{v=1}^{\infty} b_v \sin \frac{v\pi t}{\tau}$$

donde

$$b_v = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{i(t)}{I_l} \sin \frac{v\pi t}{\tau} dt$$

e  $i(t)$  se define

$$\frac{i(t)}{I_l} = \begin{cases} \left( 2 \frac{t}{\alpha\tau} - \left( \frac{t^2}{\alpha^2\tau^2} \right) \right), & 0 \leq t \leq \alpha\tau \\ 1, & \alpha\tau \leq t \leq \tau - \alpha\tau \\ \left[ \left( 1 - \frac{t - \tau + \alpha\tau}{\alpha\tau} \right) \right], & \tau - \alpha\tau \leq t \leq \tau \end{cases}$$

El valor de  $b_v$  es:

$$b_v = \frac{4}{v\pi} \left( \frac{\sin \frac{v\pi\alpha}{2}}{\frac{v\pi\alpha}{2}} \right)^2$$

donde

$$v = 1, 3, 5, \dots$$

Es importante observar que el orden de convergencia para varias formas de onda consideradas es:

<i>Onda rectangular</i>	por $\frac{1}{v}$
<i>Onda trapezoidal</i>	por $\frac{1}{v^2}$
<i>Onda rectangular</i>	por $\frac{1}{v^3}$

Estos resultados se pueden predecir por medio de la teoría general de series de Fourier, para una onda que tiene derivadas continuas hasta el orden  $n$ , pero discontinua en la derivada  $n$  sima, donde converge en  $1/v^{n+1}$ .

*Cálculo de Parámetros de la Admitancia de Red Requerida para una forma de onda Particular en Estado Estable*

Para cada término de la serie de Fourier, ecuación (1), consiste de una onda seno de amplitud  $b_v$  y frecuencia  $v/2\tau$ . Cada corriente es producida por el circuito que se muestra en la figura 3.

$$i_v = V_N \sqrt{\frac{C_v}{L_v}} \sin \frac{t}{\sqrt{L_v C_v}} \quad v = 1, 3, 5, \dots$$

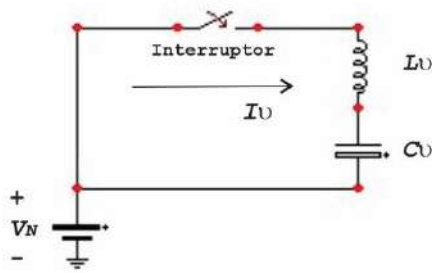


Figura 3. Circuito eléctrico generador de corriente en estado estable.

El valor para  $L_v$  y  $C_v$  se calculan utilizando los coeficientes de Fourier, ecuación (1), resolviendo:

$$L_v = \frac{Z_N \tau}{v\pi b_v}$$

$$C_v = \frac{\tau b_v}{v\pi Z_N}$$

Donde  $Z_N = Z_N/I_l$ , y es la impedancia característica de la red.

La red resultante para producir la forma de onda consiste de un número de sección resonante de secciones  $LC$   $n$  paralelo, como el circuito que se muestra en la figura 4. Los valores de  $b_v$ ,  $L_v$ , y  $C_v$  para varias formas de onda se muestran en la tabla 1.

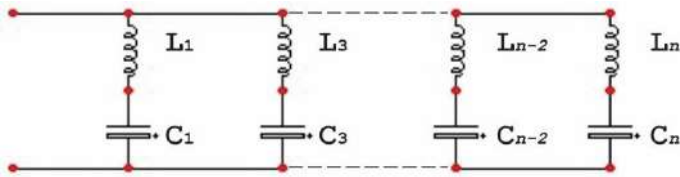


Figura 4. Diagrama de circuito eléctrico para etapa  $n$  derivada del análisis de series de Fourier para una forma de onda de corriente.

Tabla 1. Fórmulas para el cálculo de  $b_v$ ,  $L_v$  y  $C_v$  para el circuito de la figura 4.

Forma de onda	$b_v$	$L_v$
Rectangular	$\frac{4}{v\pi}$	$\frac{Z_N \tau}{4}$
Trapezoidal	$\frac{4}{v\pi} \left( \frac{\sin v\pi\alpha}{v\pi\alpha} \right)$	$\frac{Z_N \tau}{4 \left( \frac{\sin v\pi\alpha}{v\pi\alpha} \right)}$
Superior plana y subida y bajada parabólica	$\frac{4}{v\pi} \left( \frac{\sin v\pi\alpha}{v\pi\alpha} \right)^2$	$\frac{Z_N \tau}{4 \left( \frac{\sin \frac{1}{2} v\pi\alpha}{\frac{1}{2} v\pi\alpha} \right)^2}$
Forma de onda	$C_v$	

Rectangular	$\frac{4}{v^2 \pi^2} \frac{\tau}{Z_N}$
Trapezoidal	$\frac{4}{v^2 \pi^2} \frac{\tau \sin v\pi\alpha}{Z_N v\pi\alpha}$
Superior plana y subida y bajada parabólica	$\frac{4}{v^2 \pi^2} \frac{\tau}{Z_N} \left( \frac{\sin \frac{1}{2} v\pi\alpha}{\frac{1}{2} v\pi\alpha} \right)^2$

### Diseño de Redes Guillemín

Hay solo algunos tipos canónicos de redes que producen pulsos rectangulares. En contraste las redes que propone Guillemín tienen un parámetro que da forma de pulso ( $\alpha$  en las formulas) el cual, es efecto, del tiempo de subida y bajada de los pulsos generados. Este parámetro se puede seleccionar de forma arbitraria desde un valor de cero hasta la mitad (total del tiempo del pulso). El valor de cero corresponde a un pulso de forma rectangular y el valor de mitad corresponde a la forma triangular. El número de etapas requeridas para simular la forma del pulso corresponde dando un valor a  $\alpha$  y este es más o menos proporción a el valor inverso de este, esto es, una sola etapa para un valor  $\alpha = 1/2$ , por lo contrario un número mayor se etapas se requieren para generar un pulso de forma rectangular, y corresponde a un valor menor de  $\alpha$  en comparación con el anterior (Peng et al., 2021).

Además del parámetro  $\alpha$ , en las redes propuestas por Guillemín hay otro factor que puede variarse a controlar, son la consideración de la forma de las secciones de subida y bajada en la forma del pulso. La solución se limita a pulsos que tienen forma de subida y bajada lineal y parabólica. Las formas de los pulsos que tienen velocidades de aumento rápidas pueden generarse mediante redes que producen pulso de forma trapezoidal y que tienen valores bajos de  $\alpha$ ; Las formas de pulso que tienen tasas de aumento más lentas se producen por medio redes que generan pulsos de subida parabólica y por lo tanto tienen valores de  $\alpha$  más grandes, debido a los elementos almacenadores de energía utilizados.

Se considera como ejemplo una red formadora de pulso de corriente – voltaje de 5 etapas, un  $\alpha = 0.08$  (por ciento de tiempo de subida del tiempo total del pulso), una magnitud de 100 A y resistencia de carga de  $1\Omega$ .

Las primeras redes Guillemín se diseñaron basándose en una forma de pulso trapezoidal con un tiempo de subida de aproximadamente el 8 por ciento ( $\alpha = 0.08$ ). Se construyeron redes de cinco y siete secciones, pero la mejora de la red de siete etapas con respecto a la red de cinco es mínima. Por lo tanto, no se necesitan más de cinco etapas para generar un pulso que tenga un parámetro de tiempo de subida del 8 por ciento como recomendación, y esto como comentario de diseñar con cinco etapas. El número de secciones de red necesarias para producir una buena forma de pulso se puede estimar con bastante precisión observando las magnitudes relativas de los coeficientes de la serie de Fourier para la correspondiente onda de corriente alterna en estado estacionario. La amplitud relativa del quinto al primer coeficiente de Fourier es 0.04 y la del sexto al primero es 0.02, la eliminación de todos los componentes armónicos que tienen amplitudes relativas a la fundamental del 2 por ciento o menos tiene un efecto inapreciable sobre la forma del pulso, mientras que el efecto de eliminar el armónico del 4 por ciento es apreciable, aunque todavía menor.

Las redes derivadas por el método de diseño de Guillemín se realizan considerando los circuitos de la figura 4, y consisten en una serie de circuitos resonantes de etapas LC conectados en paralelo. Los parámetros para las primeras cinco etapas corresponden a los coeficientes de Fourier, y se muestran en la tabla 2. Se debe resaltar que los valores negativos de coeficientes resultan en inductancias y capacitancias para un pulso trapezoidal con un valor de  $\alpha = 0.20$ , significa que estos valores no se pueden construir para una red.

**Tabla 2.** Valores de inductancias y capacitancias para forma de onda trapezoidal, coeficientes de Fourier.

$\alpha$	$b_1$	$b_3$	$b_5$	$b_7$	$b_9$
0.05	1.2679	0.4089	0.2293	0.1474	0.0988
0.08	1.2601	0.3854	0.1927	0.1015	0.0482
0.10	1.2425	0.3643	0.1621	0.0669	0.0155
0.20	1.1911	0.2141	0	-0.0393	-0.0147

Inductancias				
$L_1$	$L_3$	$L_5$	$L_7$	$L_9$
0.2510	0.2595	0.2777	0.3578	0.3578
0.2526	0.2753	0.3303	0.4478	0.7340
0.2542	0.2912	0.3927	0.6796	2.2875
0.2672	0.4455	$\infty$	-1.1561	2.4052

Capacitancias				
$C_1$	$C_3$	$C_5$	$C_7$	$C_9$
0.4036	0.4310	0.0145	0.00670	0.00349
0.4011	0.0408	0.0122	0.00462	0.00170
0.3987	0.0386	0.0103	0.00304	0.00055
0.3791	0.0227	0	0.00179	0.00052

Redes equivalentes se derivan de los valores en la tabla 2 por y representan los modelos que propone Guillemín para la generación de pulsos de corriente y voltaje. En la figura 5 se muestran redes equivalentes de cinco etapas para producir un pulso de corriente y voltaje de onda trapezoidal con tiempo de subida de 8 por ciento.

*Diseño de Parámetros para para Redes de Capacitancias Iguales por Etapa*

Desde la perspectiva de construcción redes de capacitores iguales por etapa son más factibles que realizar equivalencias, en el circuito de la figura 6 se muestra el circuito eléctrico de este tipo de red. Los valores de las inductancias se obtienen a partir de los calculados en la red tipo D solo realizando la suma algebraica de las inductancias. Como se puede observar, todas las inductancias propias y mutuas se obtienen a partir de una bobina devanada en forma de solenoide de forma tubular (Lin & Yang, 2023).

En la red teórica tipo D reemplazando las inductancias negativas en serie en cada capacitor por inductancias mutuas adyacentes, se le refiere a la red tipo E, esta se muestra en el circuito eléctrico de la figura 6. Una forma de diseñar a la red tipo E consiste en devanar un solenoide continuo tubular de tal forma que la inductancia total  $L_N = \tau Z_N / 2$ . La Capacitancia total de la red por  $C_N = \tau / 2Z_N$ , se divide igual para las secciones, y cada capacitor se conecta en cada parte de valor de inductancia en el solenoide (Wengang, S., Lijun, et al, 2020).



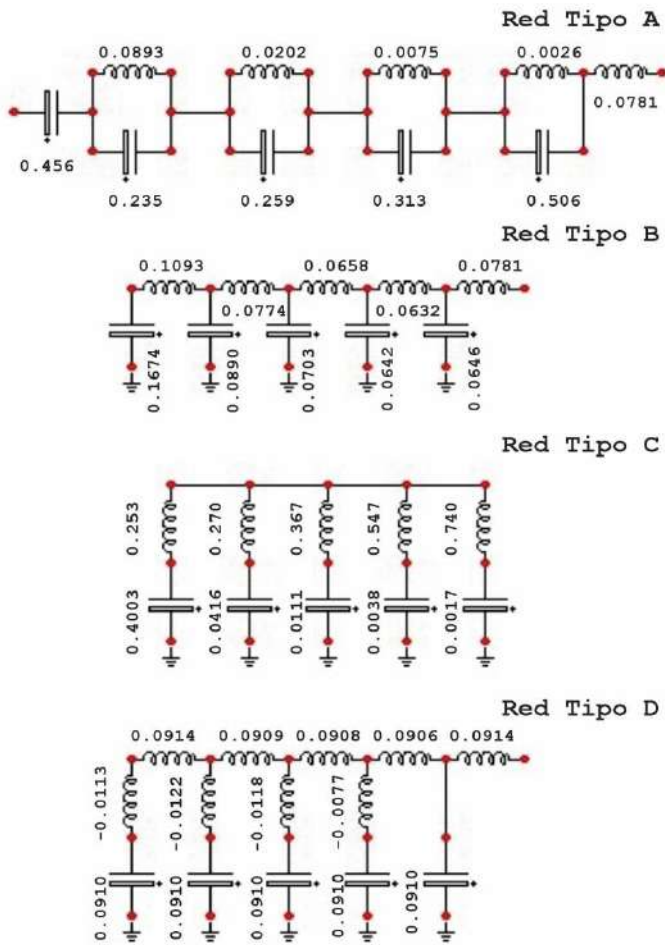


Figura 5. Redes equivalentes de cinco – secciones de Guillemín.

Como se puede observar existen algunos valores negativos para inductores y capacitores, estos valores no se pueden construir.

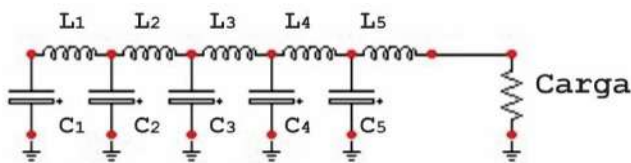


Figura 6. Red Formadora de Pulsos Tipo E de Cinco Etapas.

Las secciones se calculan de tal forma que deben tener el mismo valor de inductancia, como recomendación, excepto en las etapas inicial y final, debido que si se le aumenta del 20 al 30 por ciento se controlan las oscilaciones en la onda de corriente y voltaje.

## Resultados y discusión

Se desarrolló una corrida de programación en el programa de MATLAB<sup>®</sup> para el cálculo de cada uno de los parámetros de los elementos que compone cada una de las etapas de cada una de las redes, posteriormente se construyeron los circuitos eléctricos en el software de ATP, estos que se muestran en la figura 5. En la tabla 3 se muestran los valores para cada uno de los elementos que forman parte cada una de estas.

Tabla 3. Valores de magnitudes para los elementos de las redes formadoras de pulso.

Valor de elementos por etapa de Redes Formadoras de Pulso			
Red Formadora de Pulso <b>Tipo A</b>	Inductor (mH)	Capacitor (μF)	Carga (Ω)
Etapas 1	0.781	4600	
Etapas 2	0.893	2400	
Etapas 3	0.202	2600	
Etapas 4	0.075	3100	
Etapas 5	0.026	5100	
VOLTAJE DE CARGA		200	
Red Formadora de Pulso <b>Tipo B</b>	Inductor (mH)	Capacitor (μF)	1
Etapas 1	0.781	646	
Etapas 2	0.632	642	
Etapas 3	0.658	703	
Etapas 4	0.774	890	
Etapas 5	1.1	1700	
VOLTAJE DE CARGA		200	
Red Formadora de Pulso <b>Tipo C</b>	Inductor (mH)	Capacitor (μF)	1
Etapas 1	2.5	4000	
Etapas 2	2.7	416	
Etapas 3	3.7	111	
Etapas 4	5.5	38	
Etapas 5	7.4	17	
VOLTAJE DE CARGA		200	
Red Formadora de Pulso <b>Tipo D</b>	Inductor (mH)	Capacitor (μF)	910
Etapas 1	0.914		
Mutua	-0.113		
Etapas 2	0.909		
Mutua	-0.122		
Etapas 3	0.908		
Mutua	-0.118		
Etapas 4	0.906		
Mutua	-0.077		
Etapas 5	0.882		
Mutua	0.000		
VOLTAJE DE CARGA		200	
Red Formadora de Pulso <b>Tipo E</b>	Inductor (mH)	Capacitor (μF)	910
Etapas 1	0.805		
Mutua	0.000		
Etapas 2	0.711		
Mutua	0.154		
Etapas 3	0.668		

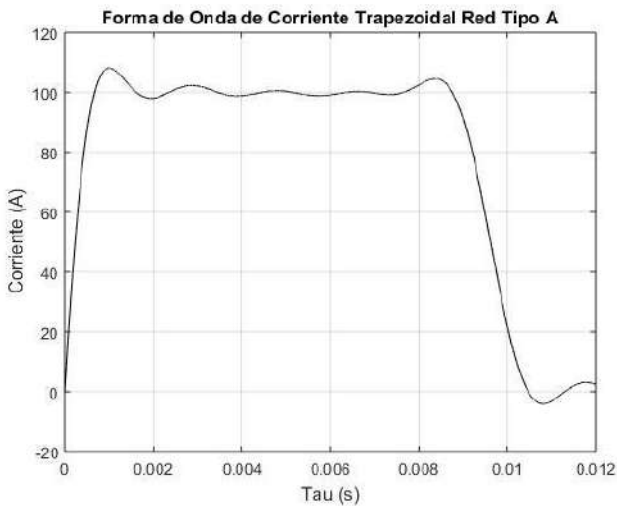
Mutua	0.236		
Etapa 4	0.674		
Mutua	0.226		
Etapa 5	0.801		
Mutua	0.000		
VOLTAJE DE CARGA	200		

*Red Formadora de Pulso Tipo A*

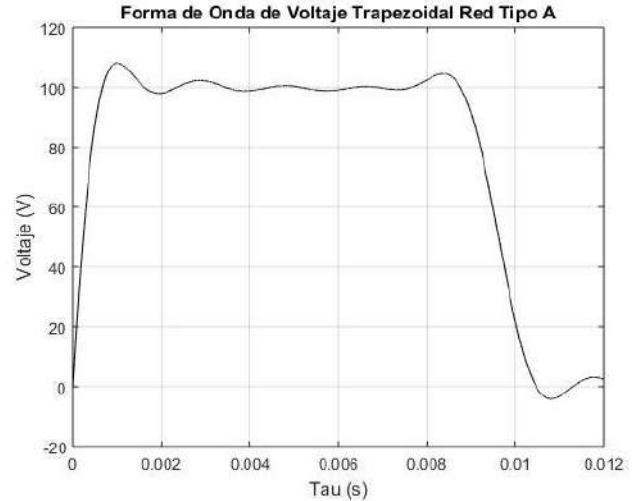
En una red tipo A de Guillemin solo se alimenta el primer el capacitor  $C_1$ , mientras que los demás elementos, junto con los inductores, se utilizan para dar forma al pulso de corriente. El diseño general de la red, el circuito de esta se muestra en la figura 5. La corriente en la carga  $i_L(t)$  de esta red es igual a la corriente en el circuito donde se localiza la etapa del capacitor  $C_1$ ,

$$i_L(t) = i_1(t) = -C_1 \frac{dv_1}{dt}$$

El voltaje  $v_1(t)$  a través del capacitor  $C_1$ , en el cual conduce el corriente en la carga.



**Figura 7.** Forma de onda de corriente en la carga de Red Formadora de Pulsos Tipo A.



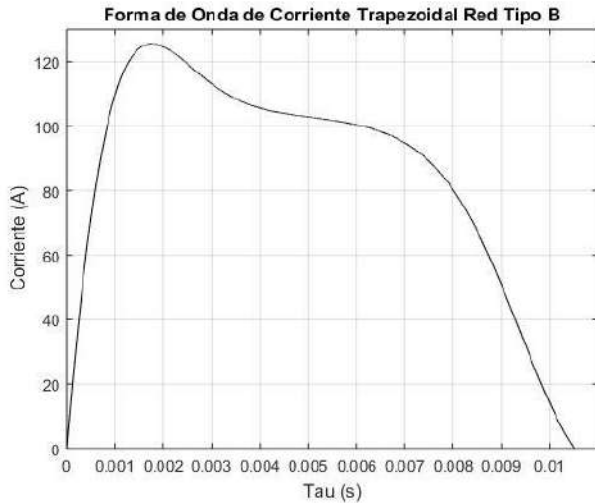
**Figura 8.** Forma de Onda de Voltaje en la carga de Red Formadora de Pulsos Tipo A.

En la gráfica de la figura 7 se muestra la forma de onda de corriente de una red formadora de pulsos tipo A, y en la gráfica de la figura 8 se muestra el voltaje en la carga con un valor de 100 V, pero el voltaje de carga en los capacitores es de 200V.

*Red Formadora de Pulso Tipo B*

Las redes de Guillemin tipo B tienen capacitores de N etapas conectados en paralelo e inductores de N etapas en serie. Si estos elementos de celda tienen valores iguales, la red Tipo B es análogo al modelo de Rayleigh de una línea de transmisión con componentes agrupados. Las redes tipo B también son similares a las redes comunes tipo E, que no son, sin embargo, considerados en este trabajo. La diferencia entre ellos es que Las redes PFN E también tienen inductancias mutuas entre las etapas como consecuencia de enrollar las bobinas en el mismo tubo. Todos los condensadores se cargan cuando la carga está conectada. El pulso de corriente sobre la carga  $i_L(t)$  de una red Tipo B se puede escribir como la suma de todas las corrientes  $i_L(t)$  que fluyen a través los inductores  $L_i$  de la red, así

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^N C_k \frac{du_k}{dt}$$



**Figura 9.** Forma de onda de corriente en la carga de red formadora de pulsos Tipo B.

En la figura 9 se muestra la forma de onda de corriente de una Red tipo B, la de voltaje se genera de la misma forma.

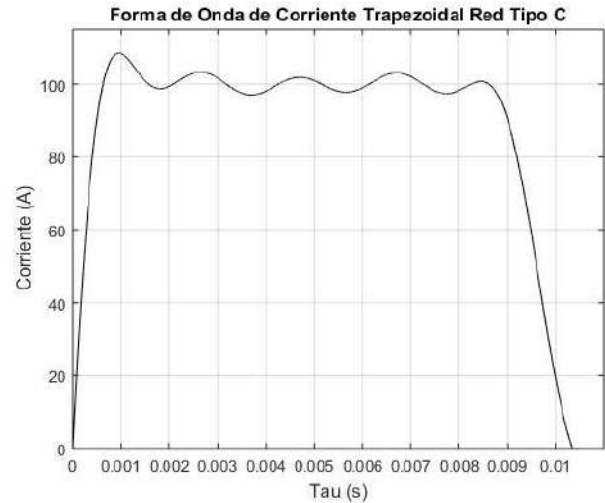
*Red Formadora de Pulso Tipo C*

El procedimiento para redes C es utilizar la teoría de Guillemín para encontrar capacitores  $C_i$  e inductores  $L_i$  para satisfacer una forma de pulso trapezoidal de acuerdo con

$$L_i = \frac{Z_0 \tau}{4}$$

$$C_i = \frac{1}{(2i - 1)^2 \pi^2 Z_0}$$

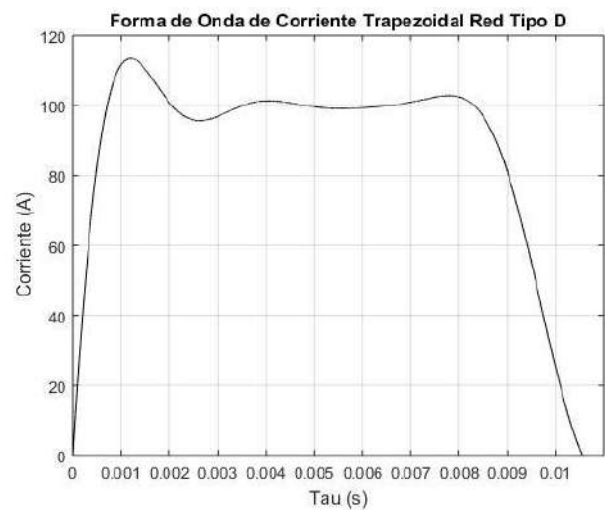
donde  $Z_0$  es la impedancia característica y  $\tau$  el tiempo de descarga, en la gráfica de la figura 10 se muestra la forma de onda de corriente de una red tipo C (Bastos et al., 2013; Liu et al., 2023; Rai et al., 2023; Wengang et al., 2020).



**Figura 10.** Forma de onda de Red Formadora de Pulso Tipo C.

*Red Formadora de Pulso tipo D*

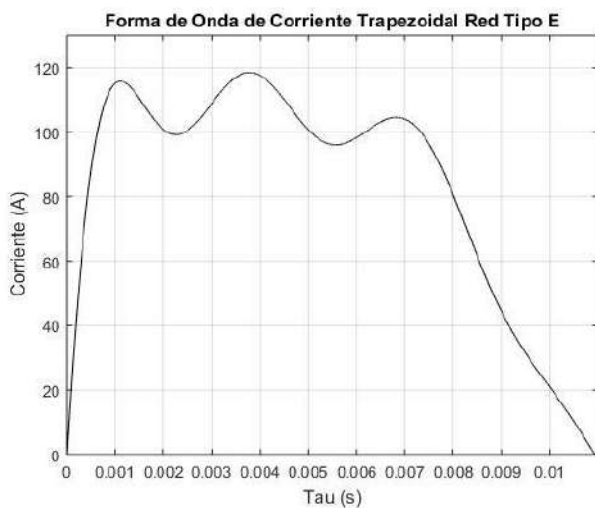
Una ventaja de la red tipo D es que la capacitancia de cada sección es igual, lo que simplifica el diseño y la fabricación. Sin embargo, aunque solo se puede producir simulación matemática, su implementación realista no lo es debido a los valores de inductancia mutuas con valores negativos en serie con cada capacitor no son realizables físicamente. En esta red, cada capacitancia tiene un voltaje de condición inicial de 200 V. Para la simulación de este, en la gráfica de la figura 11 se muestra la forma de onda de corriente que se produce con esta red.



**Figura 11.** Forma de onda de corriente trapezoidal de red formadora de pulsos tipo D.

### Red Formadora de Pulso tipo E

La red formadora de pulso tipo E se basa en el modelo de la red tipo D, pero se modifica para permitir una construcción realizable. Las inductancias en serie negativas se han reemplazado con un conjunto de valores de inductancia mutua, lo que hace que la suma algebraica de las inductancias de cada etapa sea la misma en los diseños de las redes tipo D y tipo E. Para esta red las bobinas pueden devanarse en una única forma tubular y ajustarse su separación para ajustar el acoplamiento mutuo, en la gráfica de la figura 12 se muestra la forma de onda de corriente de esta red (Chaudhuri et al., 2021; Lin & Yang, 2023).



**Figura 12.** Forma de onda de corriente trapezoidal de red formadora de pulsos tipo E.

### Conclusiones

Se presentó el análisis y simulación de pulsos de corriente – voltaje de los modelos de A. E. Guillemin por medio de redes formadoras de pulsos, de ahí las gráficas de voltaje son exactamente igual a las de la corriente, y se confirma que son iguales en forma, tiempo de duración y magnitud, como se muestra en la red tipo A, para una carga puramente resistiva. Dependiendo de la aplicación se puede seleccionar el tipo de red, una ventaja de la red tipo E es que los capacitores son del mismo valor y al construirla supera las demás debido a que no se tienen que hacer equivalentes o fabricar capacitores de los valores

requeridos para el pulso de corriente de diseño, pero la red tipo C es la más precisa, ya que se puede usar para la generación del campo magnético en el sistema de bobinas de un reactor del tipo Tokamak, pero se deben hacer modificaciones debido a que cambiaría la condición de carga a una impedancia con inductancia, y esto influye en que se puede partir de valores de capacitores en el caso de la red tipo E y ver qué tiempo se puede alcanzar del pulso de corriente – voltaje.

### Referencias

- Bastos, M. C., Martino, M., Uicich, G. C., Antoszczuk, P. D., & Pickering, J. R. (2013). 20A trapezoidal reference current pulse generator for the evaluation of current transducers. In *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)* (pp. 328-333). IEEE.
- Chaudhuri, D., Jain, S., Dalvi, S., Khatri, M., Chatterjee, S. & Bhuvanewari. G. (2021). Comprehensive Design Methodology of Switch Stack in Pulsed Power Supply for EML. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Volume: 49(4), 1489-1499
- Huang, L., Xiang, Z., Deng, B., Wang, H., Yuan, Y., Mao, Q., Cui, Y., Xie, M., Meng, J. (2023). A Compact Gigawatt Pulsed Power Generator for High-Power Microwave Application. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume: 70(7).
- Lin, J. & Yang, J. (2023). Modification of Characteristic Parameters for Plate Pulse Forming Network. *IEEE Transactions on Plasma Science*.
- Liu, Y.F., Matsumoto, H., Gu, M., Li, G.Q. & Li, S. (2023). Design of an Oil-Immersed Pulsed Modulator for X-Band 50-MW Klystron. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 51(3).
- Peng, E., Ling, W., Mao, A., Guan, J., Ma, X., Li, H., Yu, Z. & Ding, M. (2021). A Pulsed Power Supply Based on an Optimized SFPFN Scheme Producing Large Currents With a Flat Top on a Heavily Inductive Load. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10) 11221-11233.
- Rai, K.K., Giridhar, A.V., Jahagirdhar, D.R. & Rai, A. (2023). Design and Development of High-Voltage High – Pulse Power Supply Using FPGA for Dynamic Impedance Matching. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Volume: 51(7).
- Wengang, S., Lijun, Z., & Guanying, W. (2020). A Method to Restrain Parameter Drift in Trapezoidal Pulse Shaping. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 67(7), 1710-1714.
- Zhuang, L. Yang, J., Sugai, t., Tokuchi, a. and Jiang, W. (2021). Solid-State Pulsed Power Generator Based on Blumlein PFN Using Saturable Pulse Transformer. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(10), 3189-3192.

# Análisis del contenido y extracción asistida por ultrasonido de naringina de la cáscara de toronja en tres variedades cultivadas en México

María J. Monroy-Ramírez, Odette Flores-Pérez, Ángel R. Flores-Sosa, Diana López-Fitz, Rebeca Rodríguez-Martínez, Alejandro Núñez-Vilchis, Areli Rodríguez-Ontiveros, M. Moustapha Bah y Eloy Rodríguez-deLeón\*

Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas, Querétaro 76010.

\* [eloy.rodriguez@uaq.mx](mailto:eloy.rodriguez@uaq.mx)

## Resumen

La cáscara de los cítricos es una fuente importante de flavonoides. Éstos son compuestos naturales con diversos efectos benéficos para la salud humana. La toronja (*Citrus paradisi*) se destaca por poseer una cantidad significativa del flavonoide conocido como naringina. Cuando se consume un cítrico, la cáscara no es utilizada, lo que implica un desperdicio de alrededor del 50% del total del fruto. En este sentido, existe una imperante necesidad de revalorizar los recursos naturales para reducir el impacto ambiental. El presente estudio se enfocó en aprovechar el albedo de la toronja para obtener naringina mediante extracción asistida por ultrasonido (EAU), una metodología amigable con el ambiente. La naringina extraída se cuantificó mediante cromatografía de líquidos de alta resolución acoplada al detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) y su naturaleza química se confirmó mediante resonancia magnética nuclear (RMN). Además, se realizó el estudio comparativo de la calidad en tres variedades de la toronja (roja, rosa y blanca) mediante su análisis de color, sólidos solubles totales, acidez y pH. Este trabajo analiza y compara la cantidad de este compuesto presente en las tres principales variedades de toronja cultivadas en nuestro país para conocer la fuente más conveniente para la obtención de este importante flavonoide con un amplio uso en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica.

**Palabras clave:** naringina, citroflavonoides, toronja, albedo.

## Abstract

Citrus fruit peel is a relevant source of flavonoids. These compounds provide various health benefits. Among all citrus fruits, grapefruit (*Citrus paradisi*) has the highest concentration of flavonoid naringin. Typically, only the pulp of citrus fruit is used for juice, resulting in around 50% waste. In this context, it is necessary to revalue natural resources to reduce environmental impact. In this work, we used grapefruit albedo to extract naringin flavonoid through ultrasonic-assisted extraction, an eco-friendly method. High-performance liquid chromatography (HPLC-DAD) was used to quantify naringin, and its structure was confirmed by nuclear magnetic resonance (NMR). In addition, a comparative quality study was conducted among the three varieties (pink, red, and white) of *Citrus paradisi*, measuring the parameters of color, total soluble solids, acidity, and pH. This work is a comparative analysis of naringin content among the three main varieties cropped in Mexico to determine the optimal source of this flavonoid, which has high application in the pharmaceutical, food, and cosmetic industries.

**Keywords:** naringin, citroflavonoids, grapefruit, albedo.

---

Artículo arbitrado

---

Recibido:

16 de febrero de 2024

Aceptado:

11 de marzo de 2024

## Introducción

El aprovechamiento de los recursos naturales, así como la reutilización y conversión de los residuos vegetales y/o alimenticios en productos con un alto valor agregado es una actividad de suma importancia para alcanzar un desarrollo sostenible en el presente y el futuro (ONU, 2023). Esta tendencia surge debido al agotamiento de los recursos no renovables, a la contaminación generada por la no reutilización de muchos de los productos de consumo humano y por el uso indiscriminado de fuentes altamente contaminantes, principalmente las derivadas del petróleo para la obtención de una gran cantidad de insumos. Estos grandes problemas han incentivado a que exista un incremento en la investigación enfocada a revalorizar los desechos y la biomasa (Paini y col., 2022). En la búsqueda de alternativas para producir compuestos de una forma sostenible, el presente trabajo se enfocó en utilizar la cáscara de toronja (*Citrus paradisi*) para extraer el flavonoide naringina mediante una metodología amigable con el ambiente, como lo es la extracción asistida por ultrasonido.

México es el tercer productor a nivel mundial de toronja con una producción anual de 410,000 toneladas métricas (USDA, 2022). El Estado de Veracruz, seguido por los de Tamaulipas y Michoacán son los principales productores a nivel nacional. Las variedades de toronja cultivadas en nuestro país se distinguen principalmente por el color de su pulpa (roja, rosa o blanca), siendo la roja la más producida (USDA, 2022). Diversos estudios han reportado que las semillas y la cáscara de los frutos cítricos tienen un alto contenido de flavonoides; sin embargo, la cáscara posee un mayor contenido que las semillas (Tripoli y col., 2007). Los citroflavonoides (flavonoides presentes en los cítricos) son principalmente del tipo flavanonas unidas a azúcares (glicosiladas) y se ha encontrado que la naringina es una de las flavanonas glicosiladas más ubicuas en los cítricos (Scurria y col., 2021). También se conoce que

la toronja es el cítrico que posee el contenido más alto de naringina y se ha comprobado que la cantidad de este compuesto en el fruto depende de factores tales como el grado de madurez y la parte analizada (flavedo, albedo, pulpa, jugo o semilla) (Khan y col., 2014). Cuando se consume un cítrico, la cáscara no es utilizada, lo que implica un desperdicio de aproximadamente el 50% del fruto, por lo que revalorizar este residuo representa una oportunidad para extraer este compuesto, con amplia utilidad en la industria farmacéutica y alimentaria. La naringina es un flavonoide del tipo flavanona unida a dos azúcares, glucosa y ramnosa (Figura 1).

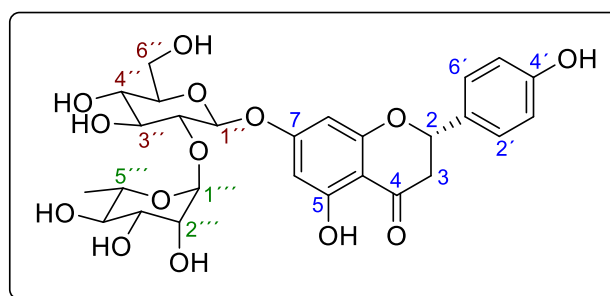


Figura 1. Estructura química de la naringina.

A la fecha, existen diversos reportes que describen los efectos biológicos de la naringina, entre los que destacan su actividad anticancerígena, antiinflamatoria y antioxidante (Chen y col., 2016). Cabe destacar que esta molécula es una materia prima conveniente para lograr la síntesis parcial de otros flavonoides con un alto valor agregado, tales como la apigenina (Martínez-Coronado y col., 2022). Finalmente, aunque es ampliamente conocido que la naringina se encuentra significativamente en la cáscara de toronja, este proyecto representa el primer estudio que analiza y compara la cantidad de este compuesto presente en las tres principales variedades de toronjas (roja, rosa y blanca) producidas en México para conocer la fuente más conveniente para la obtención de este importante flavonoide.

## Metodología

### Extracción de la naringina a partir de la cáscara de toronja (*Citrus paradisi*)

Las tres variedades de toronja fueron colectadas en el municipio de Martínez de la Torre (20°4'14.95" N, 97°3'38.81" O) en el estado de Veracruz, México. A partir de la cáscara de toronja, se separó el albedo (parte blanca) del flavedo (parte exterior). El albedo se cortó en pequeños trozos de alrededor de 5 mm. Para la extracción de la naringina por los métodos convencional y asistido por ultrasonido, se colocaron 5 g de albedo en un matraz bola de 50 mL y se le adicionaron 43 mL de metanol. La extracción convencional se realizó mediante un sistema de reflujo durante 5 horas; mientras que, para la extracción asistida por ultrasonido, se utilizó un equipo de ultrasonido comercial de 37 kHz de la marca Branson. Las condiciones de tiempo de análisis y temperatura utilizadas en esta extracción siguieron un diseño experimental  $2^K$  completo y centrado.

### Diseño experimental y análisis estadístico

Para la EAU, se evaluaron las siguientes condiciones: dos temperaturas 35 y 55 °C, dos tiempos 10 y 20 minutos y una condición intermedia (45 °C y 15 minutos). Todos los experimentos se realizaron por triplicado. Los resultados obtenidos de las respectivas extracciones correspondientes al promedio de las 3 réplicas fueron evaluados mediante ANOVA y para comprobar si existe una diferencia significativa entre los grupos (tiempo, temperatura y variedades de toronja), se realizó la prueba *post hoc* de Tukey a un nivel de significancia del 95%.

### Análisis y cuantificación de la naringina extraída

La identificación de la naringina extraída se realizó mediante cromatografía de líquidos (HPLC) usando un cromatógrafo de la marca Waters modelo Alliance acoplado a un detector de arreglo de diodos (DAD).

Los análisis se realizaron utilizando un método de fase inversa, el cual consistió en el uso de una columna agilent-Zorbax C<sub>18</sub> (4.6 x 150 mm, 5 µm) como fase estacionaria y como fase móvil, acetonitrilo y agua acidulada con ácido acético 12.5 mM, con elución en modo gradiente. La naringina presente en la cáscara de cada una de las variedades se cuantificó mediante una curva de calibración por estándar externo y la cantidad se reporta en mg/g de albedo fresco.

### Análisis colorimétrico

La calidad de los frutos se evaluó mediante análisis del color, acidez, sólidos solubles totales (SST) y pH. El análisis colorimétrico se realizó sobre el endocarpio (pulpa) de las tres variedades: roja, rosa y blanca. Los valores del espacio de color CIELab (L, a\* y b\*) fueron medidos en tres puntos de la pulpa de la toronja. La medición del color se realizó con un espectrofotómetro CM-600D (Konica Minolta, Japón) con ángulo de observador de 10° e iluminante D65. Los valores de cromaticidad (C\*) y ángulo de matiz (h°) fueron estimados con base en las ecuaciones descritas por McGuire (1992).

### Acidez titulable

Para la medición de la acidez, los SST y el pH de los frutos se realizó un extracto acuoso. A 3 g de endocarpio de toronja se adicionaron 32 mL de agua destilada y la mezcla se homogenizó utilizando un equipo Ultra-Turrax (T-25, IKA, Alemania) a 10,000 RPM durante 1 minuto; posteriormente, se centrifugó a 13,500 RPM durante 15 minutos. Finalmente, el extracto se filtró y en el sobrenadante se determinaron SST, acidez titulable y pH.

La evaluación de la acidez titulable se realizó utilizando 10 mL de extracto acuoso, los cuales se titularon con una disolución valorada de NaOH 0.1 N hasta alcanzar un pH de  $8.2 \pm 0.05$ .

### Sólidos Solubles Totales (SST) y pH

El pH y los SST se evaluaron en el extracto acuoso. El pH se midió usando un potenciómetro (HI 2213 pH/ORP meter, HANNA instruments). Adicionalmente, el contenido de SST se determinó utilizando un refractómetro digital (A. Krüss Optronic GmbH) y los resultados se reportan como porcentaje.

### Caracterización estructural mediante espectroscopia de RMN

La caracterización de la naringina extraída se realizó interpretando los espectros de RMN de <sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C, y bidimensionales, los cuales se adquirieron en un espectrómetro de 500 MHz de la marca Bruker. El compuesto se disolvió en metanol deuterado y se utilizó tetrametilsilano (TMS) como estándar interno.

### Resultados

Cada una de las variedades de toronja (Figura 2) se caracterizó físicamente mediante análisis de colorimetría y contenido de albedo.



Figura 2. Fotografía de cada una de las variedades de toronja utilizadas en este trabajo.

Los resultados del análisis comparativo de la cantidad de albedo presente en cada una de las variedades se muestran en la Tabla 1. Asimismo, los resultados del análisis del color realizado sobre la pulpa (endocarpio) de cada variedad se observan en la Figura 3.

Tabla 1. Datos de composición de las variedades de toronja.

Variedad	Peso de fruto (g)	Peso albedo (g) <sup>a</sup>	Rendimiento (%) <sup>a</sup>	Grosor Albedo (mm) <sup>a</sup>
Roja	1188.8 ± 96.7	176.7 ± 21.1	14.7 ± 1.0	5.6 ± 0.03
Rosa	1138.1 ± 96.7	152.4 ± 21.1	13.4 ± 1.0	4.2 ± 0.03
Blanca	1178.1 ± 96.7	134.4 ± 21.1	11.4 ± 1.0	4.8 ± 0.03

<sup>a</sup>Datos reportados en peso fresco.

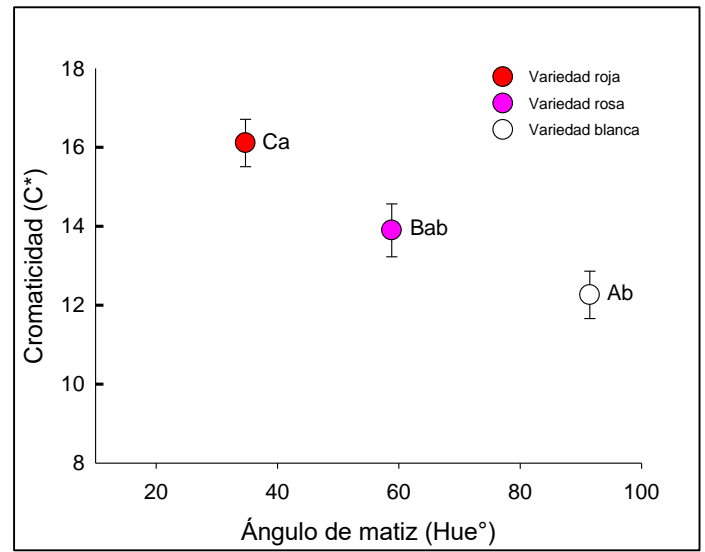


Figura 3. Análisis del color en la pulpa de las tres variedades. Los círculos representan el promedio ± error estándar (n = 10). Letras mayúsculas muestran el resultado del análisis estadístico del ángulo de matiz. Letras minúsculas muestran el resultado del análisis estadístico de la cromaticidad.

Las propiedades relacionadas con la calidad como lo son el pH, la acidez titulable y los sólidos solubles totales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de calidad de cada variedad de toronja.

Variedad	SST (°Brix)	pH	Acidez-Ácido cítrico (mg)	SST/acidez
Roja	9.8 ± 0.48	3.29 ± 0.17	0.73 ± 0.04	13.42
Rosa	8.1 ± 0.63	2.08 ± 0.04	0.51 ± 0.03	15.88
Blanca	9.9 ± 0.48	2.93 ± 0.15	0.67 ± 0.05	14.77



La cuantificación de la naringina extraída se realizó mediante HPLC-DAD. La Figura 4 muestra la curva de calibración utilizada para cuantificar las distintas extracciones.

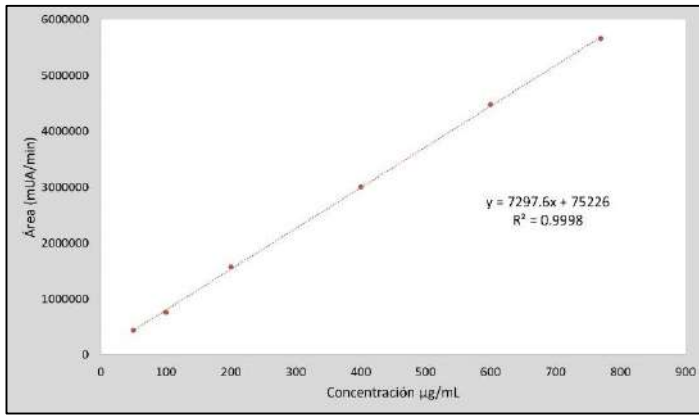


Figura 4. Curva de calibración de naringina.

Asimismo, la naturaleza química de la naringina fue confirmada mediante el análisis de sus espectros de RMN de <sup>1</sup>H (Figura 5) y <sup>13</sup>C (Figura 6).

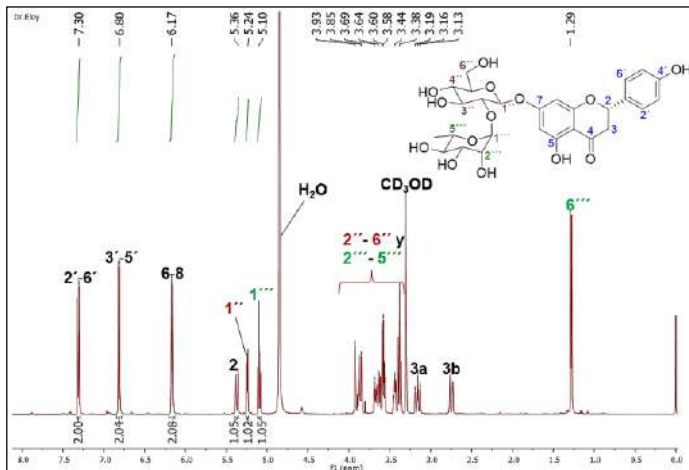


Figura 5. Espectro de RMN de <sup>1</sup>H de naringina (500 MHz, CD<sub>3</sub>OD).

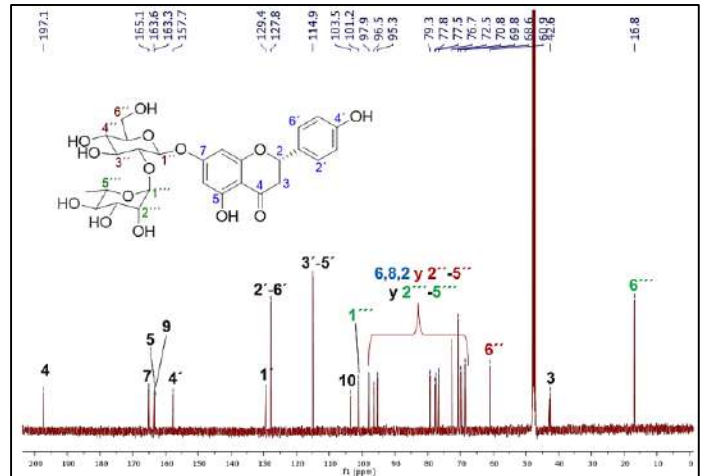


Figura 6. Espectro de RMN de <sup>13</sup>C de naringina (125 MHz, CD<sub>3</sub>OD).

La Figura 7 muestra el gráfico de superficie obtenido de las distintas condiciones utilizadas para la optimización de la extracción asistida por ultrasonido.

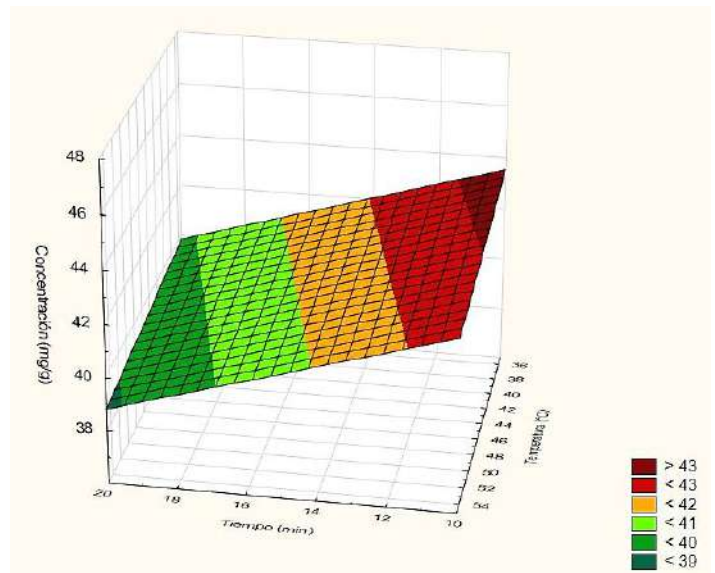
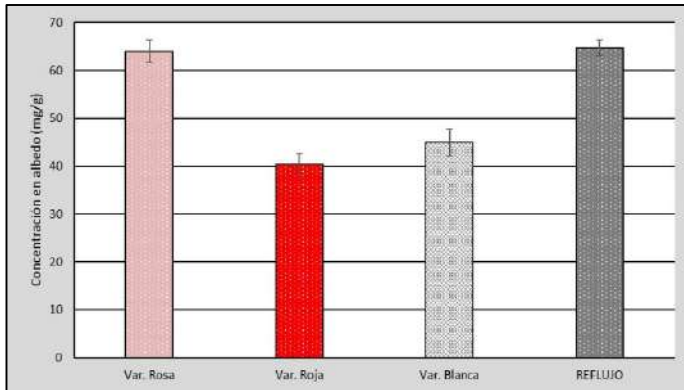


Figura 7. Gráfico de superficie de concentración contra tiempo y temperatura.

Las mejores condiciones de extracción encontradas se aplicaron en cada una de las variedades y los resultados se muestran en la Figura 8.



**Figura 8.** Concentración de naringina en cada variedad de toronja.

## Discusión

Las diferencias visuales apreciadas en la pulpa de las tres variedades de toronja (Figura 2) se confirmaron mediante análisis colorimétrico. En dicha figura también se aprecia ligeramente la diferencia entre el grosor del albedo de cada una. En la Tabla 1, se muestra el rendimiento con respecto al albedo recuperado, en el cual se observa que la variedad roja proporciona una mayor cantidad de albedo (alrededor del 14.7%) y la blanca posee una menor cantidad de albedo con alrededor de un 11.4 %.

El análisis de color confirmó que las variedades de toronja muestran diferente coloración en su pulpa. El ángulo de matiz observado en cada una de las variedades de toronja reveló que efectivamente, la variedad roja presenta esta coloración, mientras que la rosa realmente se encuentra en la zona de los naranjas, y la blanca se ubica en la región de los amarillos (Figura 3). Respecto a la cromaticidad, la variedad roja fue la que presentó mayor valor, esto indica que esta variedad muestra un color rojo con alta intensidad; por el contrario, la variedad blanca exhibió la menor cromaticidad que se traduce en que esta variedad presentó un color amarillo con poca saturación (McGuire, 1992).

También, se observó que las toronjas roja y blanca presentaron mayores valores de SST en comparación con los frutos de la variedad rosa (Tabla 2). Los SST

de manera general se asocian con los azúcares y, por lo tanto, con el dulzor de los frutos. En el caso de la toronja, se recomienda que presenten valores de SST de al menos 5.5 para que sean considerados como frutos de buena calidad (Arpaia y Kader, 1999). Estos resultados sugieren que las tres variedades presentan una calidad aceptable. Respecto a la cantidad de ácido cítrico, el cual es un parámetro asociado con el sabor ácido característico del fruto, se observó que la variedad rosa exhibió un menor contenido en comparación con la roja y la blanca. Adicionalmente, la relación SST/acidez (Tabla 2) mostró que la variedad rosa presenta un índice mayor (15.88) en comparación con la roja y la blanca (13.42 y 14.77, respectivamente). Lo anterior sugiere que la variedad rosa podría tener mejor aceptación por parte de los consumidores.

Con respecto al pH, en este caso no podría considerarse que está asociado al sabor ácido del fruto, ya que la variedad que mostró el menor pH presentó la menor cantidad de ácido cítrico, por lo que el bajo pH no es debido a la presencia de ácidos orgánicos, sino a otros metabolitos que acidifican el medio.

Por otra parte, la naringina extraída se cuantificó mediante HPLC-DAD utilizando la curva de calibración, con un coeficiente de determinación de 0.9998, un límite de detección de 1.48 mg/g y un límite de cuantificación de 2.47 mg/g, mostrada en la Figura 4. También, se logró corroborar su naturaleza química mediante la interpretación de sus espectros de RMN de  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  y bidimensionales. En la Figura 5 se muestra el espectro de  $^1\text{H}$  de la naringina, de campo bajo a campo alto se observa la presencia de los protones aromáticos en un desplazamiento químico de entre 7.30 y 6.17 ppm. Así mismo, se observa la señal del protón en la posición 2 del flavonoide a 5.32 ppm y las señales correspondientes a los protones anoméricos de los azúcares a 5.24 y 5.10 ppm.

También, se observa la presencia de los protones base de oxígeno unidos a los azúcares de la naringina entre 3.93 y 3.16 ppm y se confirma la presencia de los protones  $\alpha$  al grupo carbonilo y diastereotópicos de la posición 3 a un desplazamiento químico de 3.13 y 2.74 ppm. Por su parte, en el espectro de  $^{13}\text{C}$  de la naringina (Figura 6), se observan 27 señales correspondientes a los carbonos presentes en la molécula. De campo bajo a campo alto en el espectro se observa la presencia del carbonilo a 197.1 ppm, seguida de la presencia de los carbonos aromáticos y al mismo tiempo unidos a oxígeno entre 165.1 y 157.7 ppm y de los carbonos aromáticos pertenecientes a los anillos A y B de la estructura del flavonoide entre 129.4 y 103.5 ppm. También, se muestran las señales de los carbonos correspondientes a las unidades de glucosa y ramnosa entre 101.2 y 60.9 ppm. Finalmente, a campo alto del espectro, se observan dos señales alifáticas, una correspondiente al C-3 a 42.6 ppm y la otra a 16.8 ppm perteneciente al grupo metilo ( $\text{C}-\text{CH}_3$ ) de la ramnosa.

Con base a los resultados obtenidos de las distintas pruebas de extracción, se puede apreciar en el gráfico de superficie (Figura 7) que a la temperatura de 35 °C y a un tiempo de 10 minutos, se obtiene una concentración comparable a la obtenida a 55 °C y también al tiempo de 10 minutos. En este sentido, el utilizar una temperatura más baja permite que el método sea más sencillo y amigable con el ambiente ya que requiere de menor consumo energético. Además, se logró una reducción muy significativa de 300 minutos en el método convencional (5 horas) a tan solo 10 minutos en la extracción asistida por ultrasonido, una extracción 30 veces más rápida. Finalmente, se extrajo y se cuantificó la naringina presente en las tres variedades, utilizando las mejores condiciones encontradas (35 °C y 10 minutos). Los resultados se muestran en la Figura 8, en donde se puede observar que la variedad rosa posee el mayor contenido de naringina con  $63.9 \pm 2.3$  mg/g de albedo,

seguido de la blanca con  $45.0 \pm 2.8$  mg/g de albedo y por último la roja con  $40.3 \pm 2.3$  mg/g de albedo.

## Conclusiones

En conclusión, se logró optimizar la extracción de la naringina a partir del albedo de toronja utilizando la extracción asistida por ultrasonido, encontrándose que, en tan solo 10 minutos y a una temperatura de 35 °C se obtiene una eficiencia de extracción superior a la técnica convencional (65 °C durante 300 minutos), lo que demuestra que la EAU es 30 veces más rápida que la convencional. Asimismo, se logró confirmar mediante espectroscopia de RMN de  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  la naturaleza química de la naringina extraída.

Con respecto a la calidad de los frutos, se observó que la variedad rosa presentó el menor contenido de ácido cítrico y una mayor relación SST/acidez, por lo que se podría considerar como la variedad de mejor calidad.

Finalmente, el análisis comparativo de la cantidad reveló que, entre las principales variedades cultivadas en México, la rosa posee el mayor contenido de naringina, por lo que vale la pena el cultivo de esta como una fuente relevante para la obtención de este importante compuesto.

## Agradecimientos

Agradecemos al fondo “Química Somos Todos 2023” de la Facultad de Química de la UAQ por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto. María J. Monroy-Ramírez agradece por la beca otorgada durante la realización del presente trabajo.

## Referencias bibliográficas

Arpaia, M. L. y Kader, A. A. (1999). Grapefruit. Recommendations for Maintaining Postharvest Quality. Consultado el 03 de enero de 2024. Obtenido de: [https://postharvest.ucdavis.edu/Commodity\\_Resources/Fact\\_Sheets/Datastores/Fruit\\_English/?uid=25&ds=798](https://postharvest.ucdavis.edu/Commodity_Resources/Fact_Sheets/Datastores/Fruit_English/?uid=25&ds=798)

Chen, R., Qi, Q-L., Wang, M-T., y Li, Q-t. (2016). Therapeutic potential of naringin: an overview. *Pharmaceutical Biology*, 54(12), 3203-3210. doi: 10.1080/13880209.2016.1216131

Khan, M. K., Huma, Z-H., y Dangles, O. (2014). A comprehensive review on flavanones, the major citrus polyphenols. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33, 85-104. doi: 10.1016/j.jfca.2013.11.004

McGuire, R. G. (1992) Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27(12), 1254-1255.

Martínez-Coronado, M. F., Rodríguez-deLeón, E., Nuñez-Vilchis, A., Rodríguez-Ontiveros, A., y Bah, M. (2022). Síntesis parcial de citroflavonoides a partir de la naringina. *Revista Nthe*, edición especial, 58-66.

ONU. Organización de las Naciones Unidas. (2023). Consultado el 12 de noviembre de 2023. Obtenido de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Paini, J., Benedetti, V., Shivananda, S., Castaldi, M. J., Baratieri, M., y Patuzzi, F. (2022). Valorization of waste from the food production industry: a review towards an integrated agri-food processing biorefinery. *Waste and Biomass Valorization*, 13, 31-50. doi:10.1007/s12649-021-01467-1

Scurria, A., Sciortino, M., Albanese, L., Nuzzo, D., Zabini, F., Meneguzzo, F., Alduina, R., Presentato, A., Pagliario, M., Avellone, G., y Ciriminna, R. (2021). Flavonoids in Lemon and Grapefruit IntegroPectin. *ChemistryOpen*, 10, 1055-1058. doi: 10.1002/open.202100223

Tripoli, E., Guardia, M. L., Giammanco, S., Majo, D. D., y Giammanco, M. (2007). Citrus flavonoids: Molecular structure, biological activity, and nutritional properties: A Review. *Food Chemistry*, 104(2), 466-479. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.11.054

USDA. United States Department of Agriculture. (2022). Citrus: world markets and trade. Consultado el 08 de enero 2024 Obtenido de: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/>

USDA. United States Department of Agriculture. (2022) Mexico: citrus annual. Consultado el 12 de diciembre 2023 Obtenido de: <https://www.fas.usda.gov/data/mexico-citrus-annual-7>

# Correlación entre valores medios de volumen vehicular y siniestros en carreteras federales

Eduardo Daniel García-Gutiérrez<sup>1</sup>, Ana Cecilia Cuevas-Colunga<sup>1</sup>, Wendy Alejandra Casanova-Zavala<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte, Instituto Mexicano del Transporte. Km 12+000 Carretera Estatal No. 431 “El Colorado-Galindo” C.P. 76703, San Fandila, Pedro Escobedo, Querétaro, México.

Correspondencia: [eduardo.garcia@imt.mx](mailto:eduardo.garcia@imt.mx), [ccuevas@imt.mx](mailto:ccuevas@imt.mx), [wcasanova@imt.mx](mailto:wcasanova@imt.mx)

## Resumen

El estudio tiene por objeto la estimación de la correlación entre los volúmenes de servicio publicados por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) y la ocurrencia de siniestros en los tramos carreteros vigilados por la Guardia Nacional (GN) de 2015 a 2021 en México. Se agruparon los datos por número de carriles y debido a que los tramos no eran homogéneos en su longitud, se transformaron las variables de siniestralidad por unidad de kilómetro, posteriormente se establecieron rangos por volumen de servicio (VHP) y para cada intervalo de clase se obtuvieron los valores medios de ambas variables. A causa de que se observó alta dispersión de los datos para valores de VHP con régimen de flujo inestable, fue necesario acotar el análisis a volúmenes de servicio menores, en el caso de carreteras multicarril, se acotaron los valores que corresponden a un nivel de servicio C y para carreteras de 2 carriles hasta un VHP de 1,500. Con esta estructura de los datos se determinaron regresiones y los mejores resultados se obtuvieron con el ajuste lineal. Las regresiones lineales presentan valores de significancia del 5% y coeficientes de determinación  $R^2$  superiores a 0.77 para predecir el número de siniestros en función de los volúmenes de servicio.

**Palabras clave:** red carretera federal, siniestros, volúmenes de tránsito, volúmenes de servicio, correlación, ajuste de regresión.

## Abstract

The study aims to estimate the correlation between the service volumes published by the General Directorate of Technical Services (DGST) and the occurrence of accidents on the road sections monitored by the National Guard (GN) from 2015 to 2021 in Mexico. The data were grouped by number of lanes and because the road sections were not homogeneous in their length, the accident rate variables were transformed per kilometer unit, subsequently ranges were established by service volumes (VHP) and for each class interval the mean values of both variables were obtained. Since high dispersion of the data was observed for VHP values with unstable flow regime, it was necessary to limit the analysis to lower service volumes; in the case of multi-lane roads, the values were limited up to a service level C and for 2-lane roads up to a VHP of 1,500. With this data structure, regressions were determined and the best results were obtained with the linear adjustment. The linear regressions show significance values of 5% and coefficients of determination  $R^2$  greater than 0.77 for predicting the number of accidents as a function of service volumes.

**Keywords:** federal highway network, accidents, traffic volumes, service volumes, correlation, regression adjustment.

---

Artículo arbitrado

Recibido:

Aceptado:

16 de febrero de 2024

7 de marzo de 2024

## Introducción

Este trabajo de investigación presenta un análisis entre los volúmenes de servicio y la siniestralidad en la red carretera federal (RCF) de México que busca determinar si esos volúmenes pueden explicar estadísticamente la ocurrencia de siniestros, partiendo de la hipótesis que establece que el nivel de servicio influye en una mayor o menor ocurrencia de hechos de tránsito como lo asentaron Cadar *et. al* (2017) en su estudio realizado en carreteras nacionales de Rumania al determinar que los volúmenes de tránsito (tránsito diario promedio anual o TDPA) no presentan una relación lineal con el índice de siniestros, sino que es cuadrática convexa. Asimismo, otro estudio realizado por Retallack y Ostendorf (2020) en intersecciones detalla que, a menores volúmenes de tránsito, existe una relación lineal con la frecuencia de los siniestros, mientras que los mayores volúmenes de flujo vehicular generan una respuesta cuadrática cuando el número de siniestros aumenta a una tasa más alta. Si bien la variable independiente más utilizada en la predicción de siniestros es el TDPA Høye y Hesjevoll (2020), en este trabajo se utiliza el volumen de servicio definido como el volumen horario máximo (vehículos ligeros por hora) que puede ser alojado sin exceder los límites de los niveles de servicio durante los peores 15 minutos de la hora analizada (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board., 2016), el cual, se establece como la variable independiente en el análisis estadístico que involucra la realización de regresiones lineales y polinomiales de segundo orden con el objetivo de conocer el mejor ajuste para predecir la frecuencia de siniestros considerada como la variable dependiente.

Adicionalmente a las investigaciones descritas en el párrafo anterior, existen una serie de estudios que relacionan ajustes de regresión lineal y cuadrático o polinomial de segundo orden entre los volúmenes de tránsito y la frecuencia de siniestros como las que se muestran en la Tabla 1.

En la Tabla 1 las correlaciones cóncava y convexa se refieren a ajustes cuadráticos con forma de parábola negativa y positiva, respectivamente.

Tabla 1. Resumen de correlaciones entre volumen de tránsito y frecuencia de siniestros.

Correlación	Unidad de medida temporal del tránsito	Duración	Autores
Lineal	Año	1954-1955	(Woo, 1957)
Lineal	Año	1985	Vitaliano y Held (1991)
Lineal	Año	1954-1955	(Head, 1959)
Lineal	Día	1955	(Schoppert, 1957)
Lineal	Día	2010-2013	Sun <i>et. al</i> (2016)
Cóncava	Hora	1997-1998	(Martín, 2002)
Cóncava	Hora	1959-1963	(Gwynn, 1967)
Cóncava	Hora	1993-1995	Dickerson <i>et. al</i> (2000)
Cóncava	Hora	1993-1994	Zhou y Sisiopiku (1997)
Convexa	Año	2015	Cadar <i>et. al</i> (2017)
Convexa	Año	2003-2007	Wang <i>et. al</i> (2013)

Fuente: elaboración propia a partir de Retallack y Ostendorf (2019).

A partir de los resultados citados en la Tabla 1 los autores Retallack y Ostendorf (2019) comentan que Cadar *et. al* (2017) argumentan haber obtenido un ajuste de regresión cuadrático convexo, sin embargo, el uso de sólo siete puntos de datos y la falta de comparación estadística que evalúe la superioridad del modelo no lineal sobre uno lineal hacen que estos resultados sean cuestionables. Por otro lado, Wang *et. al* (2013) reportaron una respuesta cuadrática convexa de los siniestros en función del tránsito total anual, pero el término de segundo orden o cuadrático de la variable independiente no era estadísticamente significativo.

A raíz de los antecedentes abordados en investigaciones anteriores, resulta indispensable y

necesario generar regresiones lineales y polinomiales, principalmente de segundo orden para establecer su comparación y determinar que ajuste se apega mejor a los datos. También resulta fundamental que los términos predictores de las ecuaciones de regresión obtenidas sean significativos, de tal forma, que puedan ser utilizados para predecir la variable de respuesta o dependiente, con alto grado de certeza, en función de la variable independiente. Es por ello que, en esta investigación se consideran estos aspectos para incrementar el nivel de confiabilidad de los resultados. En ese sentido se definió un nivel de significancia de 0.05 con el que deben de cumplir las regresiones desde que Di Leo y Sardanelli (2020) mencionan que por décadas un valor menor a 0.05 ha sido convencionalmente aceptado como umbral para discriminar resultados significativos de aquellos no significativos. Los resultados obtenidos de la asociación entre los volúmenes y la frecuencia de siniestros también cumplen con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mayor o igual a 0.77 para concluir que el grado de asociación es fuerte.

Así pues, considerando un nivel de significancia de 0.05 y un  $R^2$  mayor o igual a 0.77, en el periodo de análisis que abarca los años de 2015 a 2021, se relacionaron los volúmenes de servicio de 2,731 tramos carreteros que forman parte de 515 carreteras federales con un total de 89,261 siniestros ocurridos en esas carreteras. Con este número de registros se asegura una muestra suficientemente amplia sobre las características de operación de la red carretera federal. La información de las variables sujetas de estudio se obtuvo de dos fuentes de información; la base de datos denominada Capacidad y Niveles de Servicio de la Red Carretera Federal publicada por la DGST (SICT, 2022) y la estadística de colisiones de tramos carreteros vigilados por la Guardia Nacional Cuevas *et. al* (2022).

## Método

La metodología utilizada contempla la realización de ajustes de regresión lineal y cuadrático o de segundo orden entre dos variables cuantitativas, considerando que la literatura abordada en la introducción de este artículo indica que los mejores resultados se obtuvieron con estos dos ajustes de regresión. Además, James *et. al* (2021) no aconsejan utilizar modelos de regresión polinomiales con grado mayor a tres o cuatro debido a que son susceptibles a presentar un exceso de flexibilidad (overfitting), principalmente en los extremos de la variable independiente o predictora ( $x$ ).

Los indicadores utilizados para establecer regresiones significativas con altos grados de correlación entre las variables fueron los siguientes:

1. Coeficiente de determinación  $R^2$  mayor o igual a 0.77.
2. Nivel de significancia del 5%.

A continuación, se describe la interpretación y el uso de cada indicador estadístico.

### Coeficiente de determinación $R^2$

El coeficiente de determinación se obtiene elevando al cuadrado el valor del coeficiente de correlación ( $r$ ), además, el coeficiente de determinación podrá tomar valores entre 0 y 1 Roy *et. al* (2019). Los valores cercanos a 1 indican que una gran proporción de la variabilidad de la variable de respuesta o dependiente ( $y$ ) es explicada por la variable independiente ( $x$ ). En el caso de la presente investigación, se definió que solo son aceptados ajustes de regresión que sean capaces de explicar, al menos, el 77% ( $R^2 \geq 0.77$ ) de la variabilidad observada en la cantidad de siniestros en función de los volúmenes de servicio que presentan las carreteras, es decir, que la variable independiente explique, al menos, en un 77% el comportamiento de la variable dependiente.

### Nivel de significancia

La significancia de un experimento está definida por alfa ( $\alpha$ ), donde alfa debe ser muy pequeño y lo más cercano al valor cero. En este estudio el valor que se le asignó a alfa fue de 0.05, lo que se traduce a que los coeficientes predictores de las regresiones realizadas presentan un nivel de significancia del 5%.

También resulta relevante conocer que la diferencia existente entre la unidad y el valor de alfa ( $1 - \alpha$ ) representa el nivel de confianza del experimento. Así pues, un nivel de significancia del 5% es equivalente a tener un nivel de confianza del 95% en el experimento o estudio.

Para representar los ajustes de regresión lineal y cuadrático se emplearon las expresiones matemáticas (1) y (2), respectivamente.

La ecuación (1) expresa la forma general de una regresión lineal.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e \quad (1)$$

La ecuación (2) muestra la forma de una regresión cuadrática.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + e \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) se integran de los siguientes coeficientes:

$\beta_0$  = valor de la variable dependiente cuando todos los predictores son cero.

$\beta_1$  y  $\beta_2$  = coeficientes de la variable predictora  $x$ .

$e$  = es el residual o error que representa la diferencia entre el valor observado y el estimado para el ajuste de regresión.

En este trabajo la validación del cumplimiento con el nivel de significancia definido se verificó a través de pruebas de hipótesis y utilizando el *valor p*. Por tal motivo fue necesario plantear la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_a$ ) como sigue:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0 \quad (3)$$

$$H_a: (\beta_1 = \beta_2) \neq 0 \quad (4)$$

Las hipótesis nula y alternativa planteadas en las expresiones (3) y (4) se relacionan con la significancia de una regresión ya que no poder rechazar la hipótesis nula es equivalente a mencionar que no existe una asociación entre las variables  $x$  y  $y$ . Por ende, se busca rechazar la hipótesis nula para que la relación entre las variables sea significativa de acuerdo con el nivel establecido, entonces, para tal fin, se utilizó el *valor p* o *p-value*, por sus siglas en inglés, pues, por definición corresponde al mínimo valor de significancia que llevaría al rechazo de la hipótesis nula, dicho de otra manera, aquellos *valores p* obtenidos para los predictores de la variable independiente que sean cercanos a cero son argumento para rechazar la  $H_0$ , mientras que valores altos de  $p$  indican que no se puede rechazar ésta hipótesis.

Actualmente existen muchos paquetes de software estadístico capaces de realizar las pruebas de hipótesis y calcular los valores de  $p$  para comprobar el nivel de significancia. En este estudio se utilizó el software RStudio en su versión 2023.06.1. En dicho software primero se establecieron las regresiones lineales y cuadráticas y después se evaluó el coeficiente de determinación y los valores de  $p$ , si éstos últimos valores eran menores a 0.05, los resultados se consideraron como significativos.

Es importante mencionar que el software RStudio utiliza el estadístico  $t$  para realizar las pruebas de hipótesis. El estadístico  $t$  considera los siguientes supuestos: los registros de las variables analizadas provienen de dos muestras independientes que tienen igual varianza y siguen una distribución normal. Para verificar esos supuestos de normalidad de los datos e igual varianza se realizaron gráficas de residuales estandarizados y probabilidad normal en ese mismo software.



Una vez definidos los indicadores estadísticos a revisar en los ajustes de regresión, la metodología se desarrolló en dos etapas:

### Etapa 1

Se realizó el análisis gráfico de los datos para saber si cumplen con los supuestos del estadístico *t*.

Se establecieron los ajustes de regresión lineal y cuadrático entre las variables nivel de servicio (VHP) y número de siniestros (acci) considerando los datos de todo el periodo de análisis (2015 – 2021). Se correlacionaron un total de 13,312 registros de VHP para tramos carreteros con 89,261 siniestros.

### Etapa 2

Se realizó un análisis de comparación de medias aritméticas por rangos definidos en función de los registros de la variable VHP, considerando el análisis de la información agrupada por el número de carriles con que cuentan las carreteras en ambos sentidos de circulación. Así pues, se formaron cuatro grupos; carreteras de 2, 4 6 y 8 carriles.

### Expresar la variable acci por unidad de longitud

Previo a establecer el grado de correlación existente entre los promedios de los rangos obtenidos para las variables VHP y acci, fue necesario expresar la variable número de siniestros (acci) ocurridos en cada tramo carretero en función de su longitud para tener una variable relativa con unidad de medida en siniestros por kilómetro (acci/km). De esta manera se elimina el efecto de la longitud y la concentración en el número de siniestros. Lo anterior obedece a que no era posible segmentar los tramos para que todos tuvieran la misma longitud y la información de los valores de VHP están asociados a tramos de longitud que varía de 0.07 a 196 km.

### Determinación de rangos en función de los registros de la variable VHP

Se determinaron los valores mínimos y máximos de la variable VHP para cada agrupación realizada por número de carriles. Véase Tabla 2.

Tabla 2. Valores mínimos y máximos de VHP por número de carriles.

No. carriles	Tramos	Mínimo VHP (Veh/h)	Máximo VHP (Veh/h)
2	7,731	20	4,516
4	4,921	65	11,301
6	544	213	15,292
>=8	116	920	13,193

Fuente: elaboración propia.

Una vez conocidos los valores mínimos y máximos de VHP, se propuso una amplitud de clase para cada grupo; asimismo, se determinó el número de intervalos de clase necesarios, el cual, resultó de dividir el valor máximo de VHP correspondiente a cada agrupación entre la amplitud de clase propuesta. Los resultados se ilustran en la Tabla 3.

Tabla 3. Rangos definidos para cada agrupación realizada por número de carriles.

No. carriles	Máximo (Veh/h)	Amplitud de clase (Veh/h)	Número de intervalos de clase
2	4,516	100	46
4	11,301	250	46
6	15,292	500	31
>=8	13,193	500	27

Fuente: elaboración propia.

Por cada intervalo o rango, se obtuvo el promedio del total de registros asignados para las variables VHP y acci.

Una vez agrupada la información por el número de carriles y organizada por rangos, se realizaron los ajustes de regresión lineal y polinomial de segundo orden entre los promedios obtenidos para cada rango.

### Acotación de valores de VHP

Los valores de VHP se redujeron o acotaron para cada agrupación de carreteras con la finalidad de obtener un mayor coeficiente de determinación y, por ende, una mayor correlación. Una vez acotado el

flujo vehicular se realizaron las regresiones considerando las siguientes variables dependientes:

1. Siniestros por kilómetro (acci/km).
2. Siniestros con víctimas (decesos o lesionados) por km (Acci\_cv/km).
3. Siniestros unitarios en los que solo se involucra un vehículo (Acci\_uni/km).
4. Siniestros múltiples en los que se involucran dos o más vehículos (Acci\_mul/km).

## Resultados

### Etapa 1

Primero se realizó el análisis de los gráficos de dispersión, de residuales estandarizados y el gráfico de probabilidad para observar la linealidad y normalidad de las variables a correlacionar.

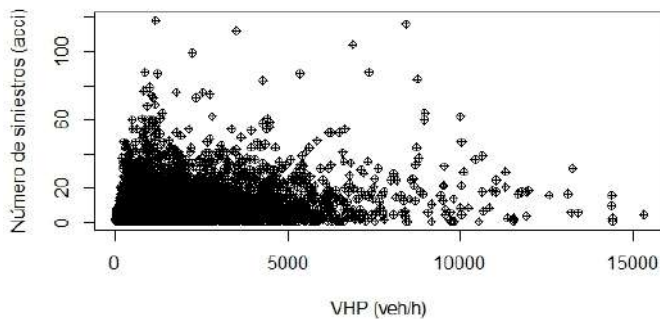


Figura 1. Gráfico de dispersión de VHP contra acci. Fuente: elaboración propia.

Los registros de la Figura 1 no muestran una tendencia lineal de los datos.

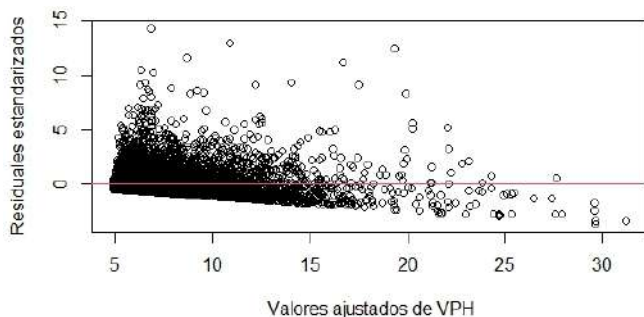


Figura 2. Gráfica de residuales estandarizados contra valores ajustados de regresión lineal de la variable independiente VHP. Fuente: elaboración propia.

Los valores de los residuales estandarizados observados en la Figura 2 no están uniformemente centrados en el valor de la media igual a cero (línea horizontal), ello indica que los datos carecen de linealidad y homocedasticidad.

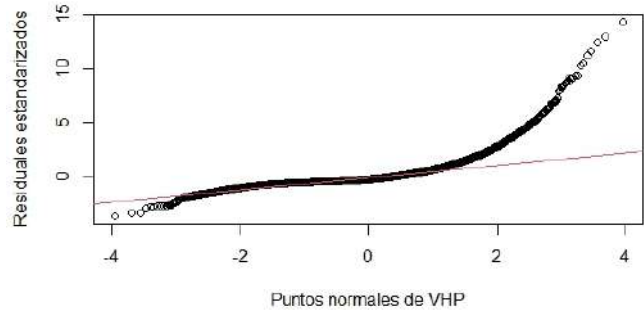


Figura 3. Gráfica de probabilidad normal de los residuales estandarizados y la variable independiente VHP. Fuente: elaboración propia.

El patrón observado en la Figura 3 indica que los valores se desvían demasiado de la diagonal de ajuste, sobre todo, a partir de dos desviaciones estándar, por lo que se concluye que los residuales estandarizados no provienen de una distribución de probabilidad normal.

Como conclusión del análisis gráfico se establece que los datos carecen de linealidad y no siguen una distribución de probabilidad normal por lo que no sería razonable realizar un ajuste de regresión lineal.

Aunque el análisis gráfico de regresión lineal dicta que este ajuste no es adecuado para las variables VHP y acci, se realizó para verificar el coeficiente de determinación y los valores  $p$  de la relación existente entre las variables. También se determinó el ajuste de regresión cuadrático. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen de coeficientes obtenidos en las regresiones realizadas para las variables VHP y acci.

Tipo de ajuste de regresión	Indicadores	
	$R^2$ múltiple	Valor $p$
Lineal	0.08489	$2.2 \times 10^{-16}$
Cuadrático	0.09943	$2.2 \times 10^{-16}$

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en la primera etapa de la metodología desarrollada indican que las regresiones cumplen con un nivel de significancia del 5% al presentar valores  $p$  por debajo de 0.05, pero los ajustes de regresión generados solo son capaces de explicar el 8.49% y el 9.94% de la variabilidad observada en la variable dependiente  $acc_i$ , estos porcentajes son muy bajos y corresponden a los valores de  $R^2$ .

## Etapa 2

A continuación, se reportan los valores  $p$  y  $R^2$  de las regresiones lineal y cuadrática realizadas entre las variables  $acc_i/km$  y VHP contemplando la información agrupada por el número de carriles y organizada por rangos. Se comparó la asociación de los promedios obtenidos para cada rango y los resultados se describen en la Tabla 5 y en la Tabla 6.

Tabla 5. Resumen de coeficientes para el ajuste de regresión lineal entre el total de registros de las variables  $acc_i/km$  y VHP.

No. carriles	R <sup>2</sup> múltiple	Valores p para la variable independiente	
		Intercepto	VHP
2	0.02749	5.23x10 <sup>-5</sup>	0.334
4	0.319	0.012345	0.000146
6	0.5982	0.219	2.24x10 <sup>-6</sup>
>=8	0.2662	0.0617	0.0083

Fuente: elaboración propia.

Los valores de  $p$  mostrados en la Tabla 5 señalan que solo existe un ajuste de regresión lineal significativo, el cual corresponde a la agrupación de 4 carriles, pues sus coeficientes predictores son menores a un valor  $p$  de 0.05.

Tabla 6. Resumen de coeficientes para el ajuste de regresión cuadrático entre los registros de las variables  $acc_i/km$  y VHP.

No. carriles	R <sup>2</sup> múltiple	Valores p para la variable independiente		
		Intercepto	VHP	VHP <sup>2</sup>
2	0.2067	0.18705	0.00631	0.01007
4	0.3772	0.63825	0.00519	0.07105
6	0.6508	0.6165	0.0015	0.0693
>=8	0.3475	0.9225	0.0305	0.1119

Fuente: elaboración propia.

Los valores de la Tabla 6 comprueban que los coeficientes de determinación mejoraron un poco respecto a los obtenidos en la regresión lineal, sin embargo, la mayoría de las agrupaciones muestran un grado de relación débil entre las variables, con excepción del grupo de carreteras que cuentan con 6 carriles. Este último grupo obtuvo una  $R^2$  de 0.6508, la cual, indica que existe una fuerte relación entre las variables analizadas.

En relación con los valores  $p$  de los términos predictores mostrados en la Tabla 6, se demostró que todas las agrupaciones revelaron valores no significativos, sobre todo, porque el predictor “intercepto” y el término cuadrático (VHP<sup>2</sup>), son mayores a 0.05.

## Resultados para valores de VHP acotados

Los primeros resultados de la etapa 2 sugieren que la mayoría de las regresiones no cumplen con una significancia del 5% y los valores de  $R^2$  son menores a 0.77. En consecuencia, se acotó el valor de VHP para cada agrupación, con el propósito de conocer hasta que límite se obtienen resultados significativos y mayor grado de asociación entre las variables. Los valores acotados de VHP se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores máximos de VHP definidos de acuerdo con la dispersión de datos.

Tramos carreteros agrupados por No. carriles	VHP máximo en ambos sentidos de circulación (vl/h)
2	1,500
4	5,000
6	7,000

Fuente: elaboración propia.

En esta parte del estudio se descartó el grupo de carreteras de ocho carriles porque solo cuentan con 116 tramos (véase Tabla 2), los cuales, son muy pocos y no se considera una muestra representativa. Además, este grupo generó los resultados menos significativos, de acuerdo con los valores expuestos en la Tabla 5 y en la Tabla 6.

En el caso de las agrupaciones de carreteras de 4 y 6 carriles, las cuales, entran en la clasificación de carreteras multicarril, de acuerdo con el Highway Capacity Manual HCM 2016 (National Research Council (U.S.). Transportation Research Board., 2016), los valores máximos de VHP definidos en la Tabla 7 e iguales a 5,000 y 7,000 vl/h, respectivamente, corresponden a un nivel de servicio C de acuerdo con las tasas máximas de flujo de servicio equivalente (MSF) descritas en el HCM 2016. El nivel de servicio C se caracteriza por mantener el rango de flujo vehicular estable, pero marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros.

En lo subsecuente se establece una comparativa gráfica con los valores totales de VHP y los valores acotados con sus respectivas regresiones lineal y cuadrática con la variable acci/km.

En las Figuras de la 4 a la 6 se muestra que con la regresión lineal realizada para los valores acotados de VHP, los coeficientes  $R^2$  son superiores a 0.77.

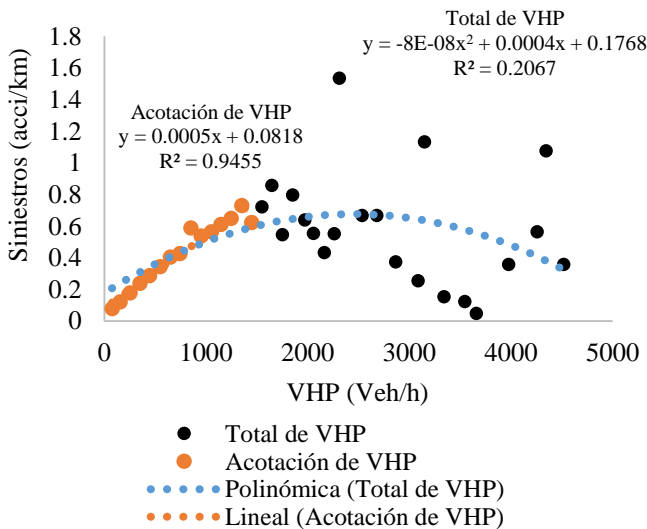


Figura 4. Comparación de medias: VHP contra acci/km en carreteras de 2 carriles. Fuente: elaboración propia.

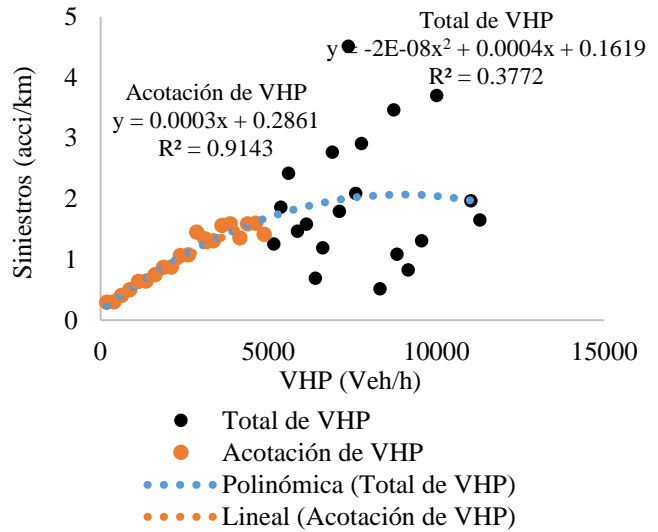


Figura 5. Comparación de medias: VHP contra acci/km en carreteras de 4 carriles. Fuente: elaboración propia.

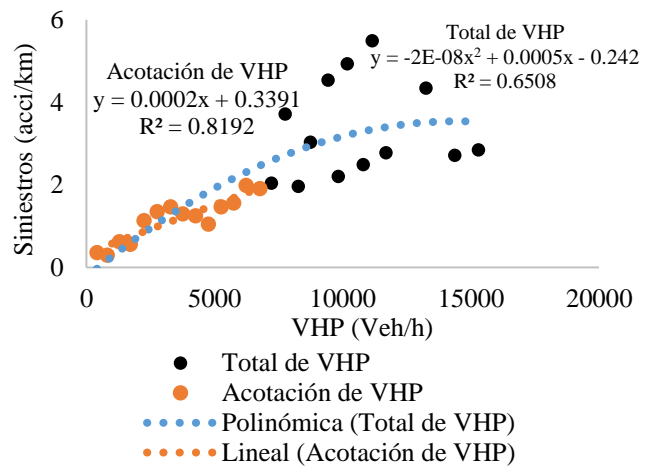


Figura 6. Comparación de medias: VHP contra acci/km en carreteras de 6 carriles. Fuente: elaboración propia.

A partir de lo expuesto en las Figuras de la 4 a la 6 y tomando lo citado por Retallack y Ostendorf (2019) en los datos descritos en la Tabla 1 de este artículo, es muy difícil que exista una regresión cuadrática convexa, sino que la asociación entre volúmenes de servicio y siniestros es cóncava según los resultados generados en este análisis gráfico. De cualquier manera, los resultados más significativos se obtuvieron con regresiones lineales, aun acotando los valores de VHP. La significancia de las regresiones realizadas se justifica con los valores  $p$  mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de coeficientes obtenidos para los ajustes de regresión lineal y cuadrático entre las variables acci/km y VHP considerando valores de VHP acotados.

	2 carriles	4 carriles	6 carriles
Ajuste lineal			
R <sup>2</sup> múltiple	0.9455	0.9143	0.8192
Valores p del ajuste lineal			
Intercepto	0.0083	0.000215	8.58x10 <sup>-6</sup>
VHP	1.36x10 <sup>-9</sup>	4.81x10 <sup>-11</sup>	8.579x10 <sup>-6</sup>
Ajuste cuadrático			
R <sup>2</sup> múltiple	0.9719	0.9496	0.8329
Valores p del ajuste cuadrático			
Intercepto	0.93435	0.25181	0.3720
VHP	3.32x10 <sup>-6</sup>	6.8x10 <sup>-7</sup>	0.0217
VHP <sup>2</sup>	0.00565	0.00305	0.3619

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 8 concluyen que, con los volúmenes de servicio acotados, las regresiones lineales son significativas, mientras que las cuadráticas no y, aunque el ajuste cuadrático generó mayores valores de R<sup>2</sup>, no se pueden utilizar esas ecuaciones para predecir el comportamiento de la variable de respuesta.

Los valores acotados de VHP y su relación con la variable acci/km son los que han presentado la mayor correlación. Considerando esos mismos valores de VHP se determinó también la relación que guardan los volúmenes de servicio con cada una de las siguientes variables dependientes expresadas por unidad de longitud:

1. Acci\_cv/km
2. Acci\_uni/km
3. Acci\_mul/km

Los resultados de R<sup>2</sup> para los ajustes lineales que cumplen con un nivel de significancia del 5% se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen de coeficientes R<sup>2</sup> para los ajustes de regresiones lineales significativas considerando valores de VHP acotados.

Variable	Número de carriles		
	Dos	Cuatro	Seis
Acci/km	0.9455	0.9143	0.8192
Acci_cv/km	0.9069	0.7725	0.7859
Acci_uni/km	0.8623	0.9347	Sin ajuste

Acci_mul/km	Sin ajuste	0.8674	0.8234
-------------	------------	--------	--------

Fuente: elaboración propia.

De conformidad con los resultados de la Tabla 9, se observa que para tramos de 6 carriles no se logró un ajuste significativo de VHP con Acci\_uni/km. Tampoco se ajustaron los valores entre el VHP y Acci\_mul/km en tramos de dos carriles. Este comportamiento tiene relación ya que los siniestros unitarios ocurren, frecuentemente, en carreteras rurales que tienen volúmenes de tránsito bajos (carreteras de 2 carriles), mientras que los siniestros múltiples se presentan más seguido en carreteras con volúmenes de tránsito altos o carreteras multicarril de acuerdo con Høye y Hesjevoll (2020) que albergan cuatro o seis carriles.

Los resultados de R<sup>2</sup> para los ajustes cuadráticos que cumplen con un nivel de significancia del 5% se detallan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen de coeficientes R<sup>2</sup> para los ajustes de regresiones cuadráticas significativas considerando valores de VHP acotados.

Variable	Número de carriles		
	Dos	Cuatro	Seis
Acci/km	Sin ajuste	Sin ajuste	Sin ajuste
Acci_cv/km	Sin ajuste	Sin ajuste	Sin ajuste
Acci_uni/km	0.9252	Sin ajuste	Sin ajuste
Acci_mul/km	Sin ajuste	Sin ajuste	Sin ajuste

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 10 indica que solo se encontró un ajuste de regresión cuadrático significativo para la variable Acci\_uni/km en tramos de dos carriles.

En el análisis de comparación de medias aritméticas por rangos, considerando la agrupación de tramos por número de carriles, acotando los valores de VHP y la asociación con las cuatro variables de siniestralidad; en los resultados la mayoría de los ajustes que cumplen con la significancia y R<sup>2</sup> del estudio se lograron con la regresión lineal y solo uno se determinó con la regresión cuadrática.

Con las ecuaciones de los ajustes lineales generados, se construyeron gráficos que ayudan a predecir el

valor promedio de siniestros por kilómetro en función de los volúmenes de servicio. Los gráficos se muestran a continuación:

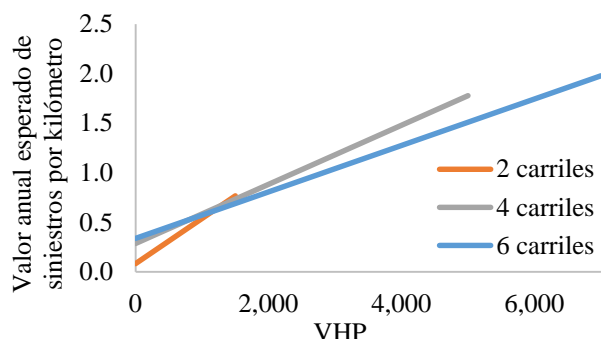


Figura 7. Gráfico de ajustes de regresión lineal significativos para acci/km. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7 se observa el siguiente comportamiento: para tramos de 2 carriles el número de acci/km, es menor al que presentan aquellos tramos de 4 y 6 carriles hasta un VHP de 1,200 vl/h, a partir de dicho valor, el número de acci/km es mayor en tramos de 4 carriles.

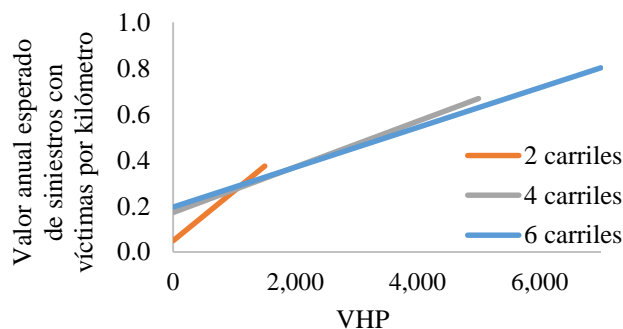


Figura 8. Gráfico de ajustes de regresión lineal significativos para acci\_cv/km. Fuente: elaboración propia.

La Figura 8 indica que el número de acci\_cv/km es mayor en el rango de 1,200 a 1,500 VHP para tramos de 2 carriles, con respecto a aquellos que cuentan con 4 y 6 carriles. Asimismo, a partir de 2,400 y hasta 5,000 VHP, la cantidad de acci\_cv/km es mayor en carreteras de 4 carriles que en las de 6.

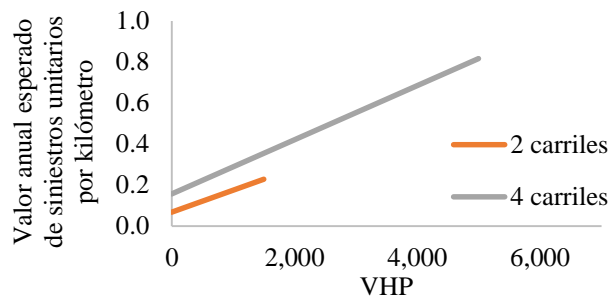


Figura 9. Gráfico de ajustes de regresión lineal significativos para acci\_uni/km. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 9 se observa que las carreteras de dos carriles mantienen la tendencia a un menor número de siniestros.

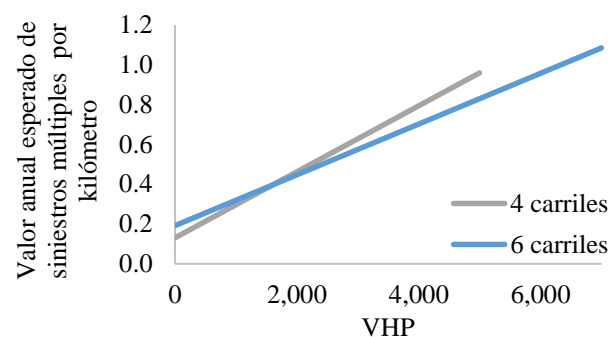


Figura 10. Gráfico de ajustes de regresión lineal significativos para acci\_mul/km. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 10 se observa que para valores de VHP mayores a 1,600, el número de Acci\_mul/km es mayor en tramos de 4 carriles que el que presentan aquellos de 6 carriles.

## Conclusiones

En este trabajo ha sido evidente que resulta complicado establecer una correlación para predecir el comportamiento de la siniestralidad en función del flujo vehicular, debido a que la siniestralidad depende de muchos factores. No obstante, se encontró que, agrupando los datos por número de carriles y, a través de los valores medios de VHP y siniestros por unidad de longitud, existe alta correlación lineal entre el nivel de servicio y la ocurrencia de siniestros, pero hasta un nivel de servicio C para carreteras de más de un carril por sentido y un VHP de 1,500 para carreteras que

cuentan con dos carriles en ambos sentidos. Después de esos volúmenes de servicio no se puede establecer una asociación entre las variables porque existe gran dispersión de los datos y este comportamiento es esperable, toda vez, que se presenta flujo inestable en la operación del tránsito.

Los mejores ajustes se lograron con la regresión lineal considerando las variables de siniestralidad expresadas por unidad de longitud y los valores acotados de VHP. La agrupación por número de carriles (2, 4, y 6) en combinación con el número de variables dependientes (acci/km, acci\_cv/km, acci\_uni/km y acci\_mul/km) implicó realizar 24 análisis; 12 para regresión lineal y 12 para regresión cuadrática. Como conclusión se establece que se encontraron 10 resultados significativos con un ajuste lineal y uno para el cuadrático, solo para el análisis de las variables dependientes acci\_uni/km y acci\_mul/km de 6 y 2 carriles, respectivamente, no se encontraron correlaciones bajo ninguna de las dos metodologías.

Por último, es necesario considerar que los ajustes de regresión realizados solo hacen distinción en el número de carriles de la vía y no entre carreteras libres y de cuota; siendo ésta última una característica de operación que suele tener un impacto importante en los siniestros y en la severidad de estos.

## Referencias

- Cadar, R., Boitor, M., & Dumitrescu, M. (2017). Effects of traffic volumes on accidents: the case of Romania's National Roads. *Geographia Technica*, 12(2), 20-29. doi:10.21163/GT\_2017.122.03
- Cuevas, A., Cadengo, M., Silva, M., & Mendoza, A. (2022). *Anuario estadístico de colisiones en carreteras federales 2021. Documento Técnico No. 85*. San Fandila: IMT.
- Di Leo, G., & Sardanelli, F. (2020). Statistical significance: p value, 0.05 threshold, and applications to radiomics: reasons for a conservative approach. *European Radiology Experimental*, 4(18). doi:https://doi.org/10.1186/s41747-020-0145-y
- Dickerson, A., Peirson, J., & Vickerman, R. (2000). Road accidents and traffic flows: An econometric investigation. *Economica*, 67(265), 101-121. doi:10.1111/1468-0335.00198
- Gwynn, D. W. (1967). Relationship of accident rates and accident involvements with hourly volumes. *Traffic Q.*, 21, 407-418.
- Head, J. A. (1959). Washington, DC.: Highw. Res. Board Bull.
- Høye, A., & Hesjevoll, I. (2020). Traffic volume and crashes and how crash and road characteristics affect their relationship – A meta-analysis. *Accident analysis and prevention*, 145. doi:10.1016/j.aap.2020.105668.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An introduction to statistical learning with applications in R*. Nueva York: Springer Science & Business Media.
- Martín, J. L. (2002). Relationship between crash rate and hourly traffic flow on interurban motorways. *Accident Analysis and Prevention*, 34(5), 619-629. doi:10.1016/S0001-4575(01)00061-6
- National Research Council (U.S.). Transportation Research Board. (2016). *Highway capacity manual: a guide for multimodal mobility* (Sexta ed.). Washington, D.C., Estados Unidos: The National Academies Press. doi:https://doi.org/10.17226/24798
- Retallack, A., & Ostendorf, B. (2019). Current understanding of the effects of congestion on traffic accidents. *Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3400. doi:10.3390/ijerph16183400
- Retallack, A., & Ostendorf, B. (2020). Relationship between traffic volume and accident frequency at intersections. *Environmental Research*, 17(4), 1393. doi:10.3390/ijerph17041393
- Roy, I., Rivas, R., Pérez, M., & Palacios, L. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista Alergia México*, 66(3), 354-360. doi:10.29262/ram.v66i3.651
- Schoppert, D. W. (1957). Washington, DC.: Highw. Res. Board Bull.
- SICT. (2022). *Capacidad y niveles de servicio en la red federal de carreteras (2021)*. Ciudad de México: DGST.
- Sun, J., Li, T., Li, F., & Chen, F. (2016). Analysis of safety factors for urban expressways considering the effect of congestion in Shanghai, China. *Accid Anal Prev*, 95, 503-511. doi:10.1016/j.aap.2015.12.011
- Vitaliano, D., & Held, J. (1991). Road accident external e. *Applied Economics*, 23(2), 373-378. doi:10.1080/00036849100000146

Wang, C., Quddus, M., & Ison, E. (2013). A spatio-temporal analysis of the impact of congestion on traffic safety on major roads in the uk. *Transportmetrica A*, 9(2), 124-148. doi:10.1080/18128602.2010.538871

Woo, J. C. (1957). *Correlation of Accident Rates and Roadway Factors*. Lafayette: Purdue University.

Zhou, M., & Sisiopiku, V. P. (1997). Relationship between volume-to-capacity ratios and accident rates. *Transp. Res. Rec.*, 1581(1), 47-52. doi:10.3141/1581-06



# Determinación numérica de permeabilidades de fibras unidireccionales en arreglos asimétricos

Jaqueline de los Ángeles Viveros González, Edgar Adrián Franco Urquiza, Carlos Amir Escalante Velázquez\*,

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, Santiago de Querétaro, Qro.

\*Correspondencia: carlos.escalante@cidesi.edu.mx

## Resumen

La manufactura de materiales compuestos formados a partir de resinas reforzadas con tejidos de fibras, se hace mediante procesos conocidos como moldeo por transferencia de resina. Una variable que gobierna este proceso de flujo de resina es la permeabilidad de los tejidos de fibras, la cual también determina el tiempo de duración de dicho proceso, típicamente la permeabilidad se determina experimentalmente. Actualmente existe una tendencia a calcular variable, mediante métodos computacionales. En este trabajo se presenta una metodología computacional para determinar la permeabilidad (transversal y longitudinal) de fibras unidireccionales a partir del concepto de flujo en celdas unitarias. Después, dicha metodología es aplicada para la determinación de la permeabilidad de arreglos asimétricos en serie (1 x 2), formados a partir de la combinación de un conjunto de celdas unitarias propuestas. Finalmente, se explora la posibilidad de estimar de manera analítica la permeabilidad (transversal y axial) de los arreglos de fibras a partir de los valores de las permeabilidades de celdas unitarias, se encontró que dicha estimación es viable mediante fórmulas simples para el caso de permeabilidades transversales, pero no para el caso de permeabilidades axiales.

**Palabras clave:** materiales compuestos, permeabilidades, resina y fibras, CFD.

## Abstract

The manufacture of composite materials formed from resins reinforced with fiber fabrics is done through processes known as resin transfer molding. A variable that governs this resin flow process is the permeability of the fiber fabrics, which also determine the duration of such process, typically the permeability is determined experimentally. In this work, a computational methodology is presented to determine the permeability (transverse and longitudinal) of unidirectional fibers based on the concept of flow in unit cells. Afterwards, such methodology is applied to determine the permeability of asymmetric series arrangements (1 x 2), formed from the combination of a set of proposed unit cells. Finally, the possibility of analytically estimating the permeability of fiber arrangements from the values of the permeability of unit cells is explored. It was found that such estimation is viable using simple formulas for the case of transverse permeability and but not for the case of axial permeability.

**Key words:** composite materials, permeability, resin and fibers, CFD.

---

Artículo arbitrado

---

Recibido:

16 de febrero de 2024

Aceptado:

8 de marzo de 2024

## Introducción

En los últimos años los materiales compuestos, formados a partir de resinas poliméricas y un refuerzo de fibras de carbono o fibras de vidrio (en forma de tejidos), se han venido utilizando ampliamente en diferentes industrias como la automotriz, aeronáutica, construcción, deportes, etc. El uso de estos materiales se debe a las propiedades mecánicas que ofrecen como lo son su elevada rigidez y resistencia a baja densidad (Porto, et. al 2018).

La fabricación de componentes de material compuesto se realiza mediante diversos procesos de manufactura conocidos como moldeo por transferencia de resina líquida (LCM, por sus siglas en inglés), que consiste en la infusión de resina líquida en un molde cerrado (Pierce 2017).

En este sentido, un parámetro que gobierna la dinámica de la resina sobre estos tejidos es la permeabilidad o la conductividad de las fibras. La importancia de este parámetro radica en que determina el tiempo de llenado del molde, además si se conoce su valor para diferentes tejidos es posible modelar el flujo en arreglos de fibras.

Este parámetro se determina experimentalmente, pero cada vez hay mayores esfuerzos para su determinación mediante métodos computacionales (Ali M. A. et al. 2018; Liu H. & Hwang W. 2012; Endruweit A. et al. 2014), debido a que se reduciría significativamente el trabajo experimental. La permeabilidad depende de muchos factores, entre los que destacan la arquitectura de las fibras y su porosidad, es decir, de los espacios abiertos por donde la resina puede pasar.

Una de las arquitecturas de fibras más utilizadas para desarrollar y validar metodologías para determinar permeabilidades son las fibras unidireccionales. Como su nombre lo indica se trata de arreglos unidireccionales de “mechas” (tows) de fibras largas que pueden contener unos cuantos miles de fibras, estas mechas pueden medir unos cuantos milímetros. Para modelar el

flujo en este tipo de fibras diversos autores han idealizado la sección transversal de dichas mechas, siendo la sección elíptica la más utilizada. Sin embargo, la forma de las mechas no es homogénea y esta puede modificarse por diversos factores durante el proceso de manufactura, así que su sección transversal puede variar.

En una serie de trabajos Endruweit y sus colaboradores, (Wong C. et al. 2006; Endruweit A. et al. 2014; Endruweit A. et al. 2018), los autores desarrollaron estudios para determinar las permeabilidades de tejidos de fibras unidireccionales con diferentes secciones transversales.

En este trabajo presentamos una extensión al trabajo de (Wong C. et al. 2006), para determinar computacionalmente la permeabilidad longitudinal y transversal de arreglos de fibras unidireccionales asimétricas. Primero, dicha metodología se validó con datos reportados en la literatura y después se extendió para considerar arreglos asimétricos a partir de un conjunto base de secciones transversales propuesta.

La motivación principal de este trabajo es responder a la siguiente pregunta: ¿es posible estimar la permeabilidad de un arreglo asimétrico de fibras a partir de los valores correspondientes de celdas unitarias?

## Metodología y materiales.

Para el cálculo de la permeabilidad, se hace uso del concepto de celdas unitarias, las cuales son geometrías representativas que pueden ser caracterizadas mediante parámetros geométricos bien definidos. En nuestro caso, las celdas unitarias son como la que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, cada mecha (tow) tiene un ancho  $l$  y una altura  $h$  y está inscrito dentro de una celda rectangular de ancho  $L$  y altura  $H$ .

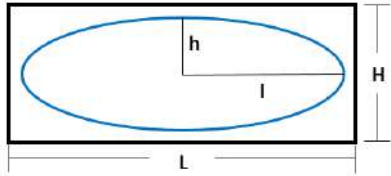


Figura 1. Parámetros de la celda unitaria

Para determinar la permeabilidad, es necesario considerar el flujo sobre el tow, en dos dimensiones para el caso transversal y en tres dimensiones para el caso axial. Cabe mencionar que no se considera el flujo a través de las mechas pues es conocido que la permeabilidad dentro de las fibras es 100 más pequeña que las que se observan sobre estas. Por lo que básicamente se considera el flujo de la resina como si se tratase de canales abiertos.

### Cálculo de la permeabilidad

La permeabilidad se puede calcular, a partir de la Ley de Darcy, Ecuación (1, la cual describe el flujo de un fluido a través de un canal, como sigue (Wong C. et al. 2006),

$$\langle u \rangle = \frac{k * \Delta P}{\mu * L} \quad (1)$$

Donde  $k$  es la permeabilidad,  $\langle u \rangle$  la velocidad promedio,  $\mu$  es la viscosidad del fluido,  $L$  la longitud de la celda unitaria y  $\Delta P$  la diferencia de presiones. En este trabajo determinamos numéricamente la velocidad promedio en celdas unitarias, así es posible determinar la permeabilidad a partir de la Ecuación 1, como sigue

$$k = \frac{\langle u \rangle \mu L}{\Delta P} \quad (2)$$

Las permeabilidades de las diferentes configuraciones que se analizaron, se estimaron numéricamente utilizando los métodos de dinámica de fluidos computacional (computational fluid dynamics, CFD por sus siglas en inglés) que consiste en tres partes: pre-procesamiento, simulación y post-procesamiento.

En la primera parte se define la geometría, las condiciones de frontera y las ecuaciones que gobiernan el fenómeno a analizar. Mientras que, en la segunda parte, se determinan los métodos de solución de las ecuaciones discretizadas y finalmente en la tercera parte se hace un análisis de los resultados obtenidos en base a los parámetros de interés.

### Geometrías y dominios de mallado. Celdas unitarias (2D y 3D).

Dado que nos interesa considerar secciones transversales diferentes a la sección elíptica, esto se puede hacer mediante una función que determina la forma de dicha sección y que puede definirse de la siguiente manera (Endruweit A. et al. 2018)

$$y = \pm h \left( 1 - \frac{x^2}{\left( h * \left( \frac{l}{h} \right)^2 \right)^2} \right)^n \quad (3)$$

En donde,  $n$  es el parámetro de forma que determina la forma de la sección transversal,  $h$  es la altura y  $at = l/h$ , es el cociente de aspecto (véase Figura 1).

Siguiendo la metodología de (Wong C. et al. 2006; Endruweit A. et al. 2018) dependiendo de las características geométricas de las celdas unitarias, se puede estudiar el efecto de cuatro parámetros geométricos sobre la permeabilidad. El primer parámetro (P1) es la relación de aspecto del tow ( $at = l/h$ ), el segundo (P2) define la forma del tow ( $n$ ), el tercer parámetro (P3) corresponde a la fracción de volumen máxima de fibra para el caso nominal (cuando la altura y el ancho de la celda son equivalentes a los del tow) y el último parámetro (P4) es la relación de aspecto de la celda ( $ac = L/H$ ).

En nuestro caso para generar las diferentes geometrías, en base a la Figura 3 y a los parámetros antes mencionados se escribió una rutina en el lenguaje de programación Python, la cual permite exportar los puntos de las diferentes geometrías en un archivo que puede importarse posteriormente desde ANSYS Workbench.

En la Tabla 1, se muestran figuras representativas de las celdas unitarias que se obtienen. En este caso se consideró que el cociente de aspecto es igual a la relación de aspecto ( $at = ac$ ), columna 3. Mientras que en la columna 1 y 2 se muestran la forma de la sección y su factor de forma asociado, respectivamente. En la columna 4, se muestra el valor de la porosidad ( $\phi$ ) correspondiente a cada celda unitaria. Para este caso, se puede notar que variando el factor de forma ( $n$ ), desde una sección rectangular hasta una sección elíptica, la porosidad varía desde 0.236 hasta 0.372.


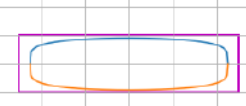
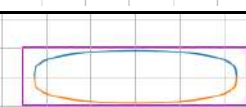
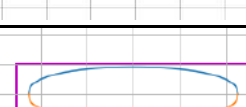
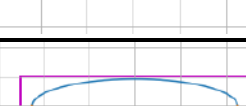
Celda unitaria	$n$	$at = ac$	$\phi$
	0.1	5	0.236
	0.2	5	0.273
	0.3	5	0.306
	0.4	5	0.335
	0.5	5	0.372

Tabla 1. Celdas unitarias con variación en el factor de forma del tow ( $n$ ) con su respectiva porosidad.

Otras configuraciones que se pueden obtener, se muestran en la Tabla 2. En este caso, se mantuvo constante la sección transversal ( $n = 0.3$ ) y lo que se varió fue la relación de aspecto de la celda ( $ac$ ). En este caso las porosidades resultantes son casi iguales.

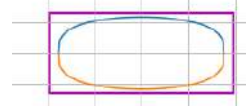
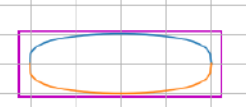
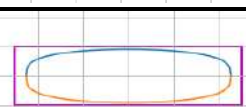
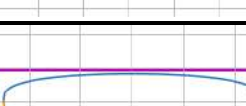

Celda unitaria	$n$	$ac$	$\phi$
	0.3	3	0.3065
	0.3	4	0.3061
	0.3	5	0.3058
	0.3	6	0.3056
	0.3	7	0.3055

Tabla 2. Celdas unitaria con la variación en la razón de aspecto con su respectiva porosidad

### Geometrías de secciones transversales asimétricas.

Basándonos en la función de forma presentada en la sección anterior y el código que desarrollamos, el siguiente paso consistió en generar arreglos en serie de dos fibras a partir de las combinaciones de las formas “básicas” mostradas en la Tabla 1. Para simplificar las cosas elegimos una relación de aspecto constante,  $ac = 5$ . Dado que se tienen 5 posibles formas (cinco valores de  $n$ ), se pueden tener 25 posibles combinaciones de celdas, pero de las cuales solo 15 son diferentes, además de esas 15, 5 corresponden a celdas simétricas.

En la Tabla 3 se muestra la porosidad de cada una de las 15 configuraciones. En la misma tabla se

muestran las combinaciones de factores de forma ( $n_1$  y  $n_2$ ) que dan lugar a dichas configuraciones. Las combinaciones en la diagonal ( $n_1 = n_2$ ) corresponden a arreglos simétricos mientras que los cuadros fuera de la diagonal ( $n_1 \neq n_2$ ) corresponden a arreglos asimétricos. Los valores de porosidad para las combinaciones por encima de la diagonal se omitieron pues son idénticos a sus contrapartes por debajo de la diagonal.

Porosidad ( $\phi$ )					
$n_1/n_2$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	<b>0.236</b>	-	-	-	-
0.2	0.254	<b>0.273</b>	-	-	-
0.3	0.271	0.289	<b>0.306</b>	-	-
0.4	0.285	0.304	0.320	<b>0.335</b>	-
0.5	0.304	0.322	0.339	0.353	<b>0.372</b>

Tabla 3. Porosidad de celdas unitarias en serie de celdas analizadas.

Para estos arreglos en serie determinamos la permeabilidad transversal (2D) y longitudinal (3D). En la Figura 2, se muestra una imagen representativa de un arreglo de fibras en serie.

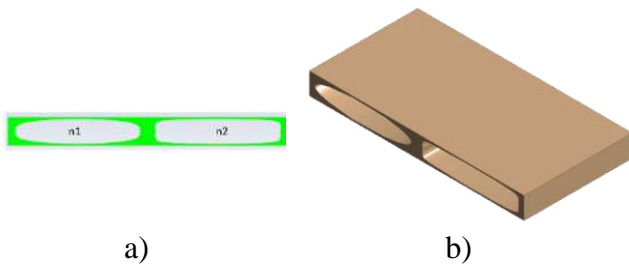


Figura 2. a) Vista transversal de celda unitaria 2D de arreglo de fibras, b) Vista isométrica de celda unitaria 3D de arreglo de fibras.

### Materiales

Los valores de densidad y viscosidad del fluido que se usaron en la simulación corresponden a los de la resina EPOLAM 2019, con la que se hacen infusiones de resina y se muestran en la Tabla 4.

<b>Densidad</b>	1150 kg/m <sup>3</sup>
<b>Viscosidad dinámica</b>	0.25 kg/m.s

Tabla 4. Propiedades de resina EPOLAM 2019

### Implementación de CFD.

#### Condiciones de frontera/Solver

Los análisis de dinámica de fluidos computacional más comunes y los que se usaron en este trabajo, consistieron en la solución numérica de las ecuaciones estacionarias para flujo laminar dado que las velocidades son bajas, los números de Reynolds son pequeños ( $\sim 10^{-4}$ ) por lo que no se requirió utilizar ningún modelo de turbulencia. Como método de solución se usó el método SIMPLE.

Como condiciones de frontera, se implementaron condiciones de entrada y salida en las paredes verticales de la celda unitaria, en los límites superiores e inferiores se aplicó condiciones de antideslizamiento y condición de pared en la pared del tow (véase Figura 3). Condiciones similares se aplicaron en el caso 3D.

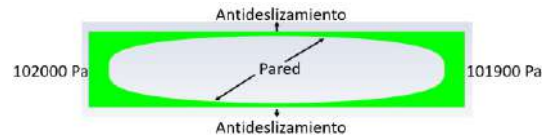


Figura 3. Condiciones de frontera de la celda unitaria.

*Post-procesamiento:* Se busca obtener la velocidad promedio del fluido dentro del dominio, el valor obtenido es utilizado en el cálculo de la permeabilidad en la Ecuación 2.

### Equipo de cómputo

Para la ejecución de las simulaciones se usó el siguiente equipo de cómputo: 1) Laptop DELL Inspiron 5567, Intel ® Core (TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz (2 núcleos) (4 procesadores lógicos), 8 GB RA, sistema operativo de 64bits, procesador x64. Se usó una licencia académica ANSYS-FLUENT 2022 R2.

### Análisis de sensibilidad de malla

Para que los resultados de los análisis numéricos de fluidos sean confiables, estos no deben

dependen del número de elementos en los que se discretiza el dominio del flujo. En nuestros análisis, para cada configuración que se analizó se hizo un estudio de sensibilidad de malla (esto es, se generaron mallas computacionales con diferentes números de elementos) y se evaluó el comportamiento de la permeabilidad como función del número de elementos de las mallas. Además, se garantizó que las mallas computacionales utilizadas en los estudios reportados en la siguiente sección cumplieran las métricas de ortogonalidad (menor 0.99) y oblicuidad (mayor 0.1), que fueran muy refinadas cerca de la sección transversal de las mechas.

En la Figura 4 se muestran imágenes representativas de las mallas computacionales que se generaron.

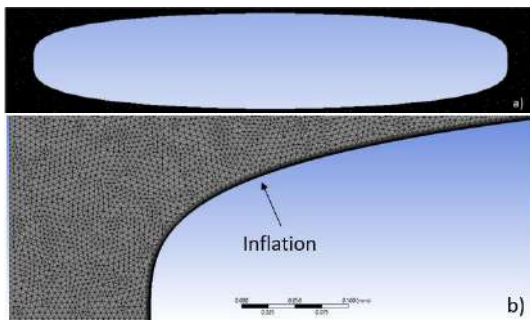


Figura 4. Tipo de mallado, a) Face sizing en el dominio de la celda unitaria 2D con elementos triangulares, b) Face sizing en el dominio con elementos triangulares con refinamiento en la pared del tow.

En la Tabla 5 se muestra el número de elementos para las diferentes mallas que se generaron a partir de las geometrías analizadas.

Configuración	Número de elementos
Celda unitaria 2D	55000
Celdas en serie 2D	110000
Celda unitaria 3D	240622
Celdas en serie 3D	469632

Tabla 5. Número de elementos de las diferentes geometrías de celdas unitarias.

## Resultados

En la Figura 5, se muestra una figura representativa del análisis de sensibilidad de malla, que se obtuvieron para las diferentes geometrías. Como puede verse para este caso, solo fue necesario usar mallas con 55000 elementos, aproximadamente.

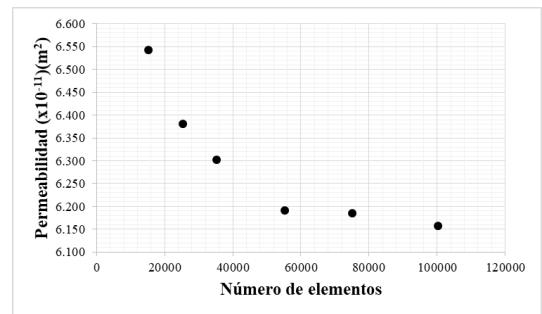


Figura 5. Análisis de sensibilidad de malla

## Permeabilidades en celdas unitarias. Validación

En esta sección se presentan resultados obtenidos para la permeabilidad transversal en las celdas unitarias, los resultados se comparan con los resultados presentados por (Wong C. et al. 2006).

En la Figura 6, se muestra el comportamiento de la permeabilidad como función de la forma de la sección transversal, véase Tabla 1. En este caso, se observa que al incrementarse la porosidad la permeabilidad también se incrementa, al tener una mayor porosidad el paso de fluido a través de los canales es más rápido, esto genera una velocidad mayor y una alta permeabilidad.

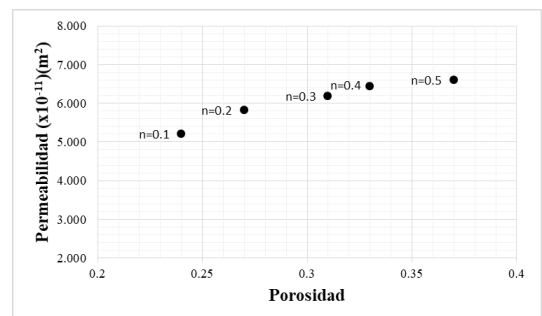


Figura 6. Gráfica de permeabilidad como función de la porosidad, modificando la forma del tow (n).

En la Figura 7, se muestra la permeabilidad como función de la relación de aspecto de la celda unitaria.

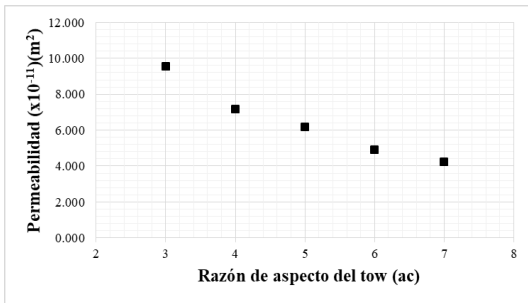


Figura 7. Gráfica de permeabilidad vs razón de aspecto (ac) del tow, correspondiente a  $n = 0.3$  (véase Tabla 2)

En este caso, se observa una reducción de la permeabilidad al incrementar la razón de aspecto, esto se debe a la reducción de espacio entre los canales superior e inferior por donde fluye el fluido, creando una restricción al fluido al incrementarse la razón de aspecto, véase Tabla 2. Un aspecto adicional de estos resultados, es el hecho de que la permeabilidad tiene valores diferentes para diferentes configuraciones geométricas, pero con “idéntica” porosidad.

### Permeabilidad transversal en arreglos asimétricos.

En la Tabla 6, se muestran los valores de permeabilidad transversal obtenidos mediante simulación computacional para las 15 configuraciones analizadas.

Permeabilidad transversal (x10 <sup>-11</sup> )(m <sup>2</sup> )					
n <sub>1</sub> / n <sub>2</sub>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	<b>5.208</b>	-	-	-	-
0.2	5.053	<b>4.909</b>	-	-	-
0.3	5.505	5.411	<b>6.152</b>	-	-
0.4	5.515	5.408	6.298	<b>6.442</b>	-
0.5	5.470	5.396	6.331	6.499	<b>6.614</b>

Tabla 6. Valores de permeabilidad transversal de celdas en serie obtenidos numéricamente y correspondiente a diversos arreglos.

En la Figura 8, se muestra la permeabilidad transversal como función de la porosidad para estas configuraciones, como puede verse, en general se tiene un incremento de la permeabilidad

como función de la porosidad, como en el caso anterior.

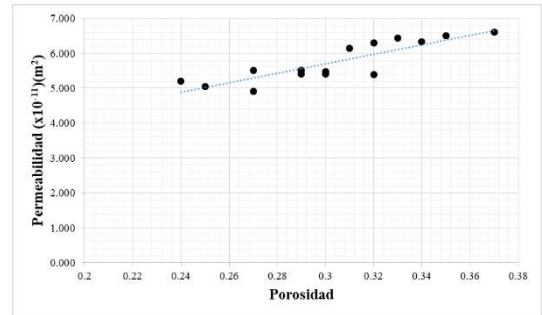


Figura 8. Permeabilidad transversal como función de la porosidad para celdas unitarias en serie.

### Permeabilidad axial en arreglos asimétricos.

En la Tabla 7, se muestran los valores de permeabilidad axial obtenidos mediante simulación computacional para las 15 configuraciones analizadas.

Permeabilidad x 10 <sup>-9</sup> (m <sup>2</sup> )					
n <sub>1</sub> /n <sub>2</sub>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	<b>1.324</b>	-	-	-	-
0.2	1.353	<b>1.381</b>	-	-	-
0.3	1.588	1.602	<b>1.801</b>	-	-
0.4	1.723	1.734	1.916	<b>2.027</b>	-
0.5	1.868	1.872	2.046	2.150	<b>2.262</b>

Tabla 7. Permeabilidad axial (Kg) de celdas en serie mediante simulación computacional.

En la Figura 9, se muestra la permeabilidad como función de la porosidad para el caso axial, de manera similar a los casos anteriores hay consistencia en el incremento de la permeabilidad como función de la porosidad.

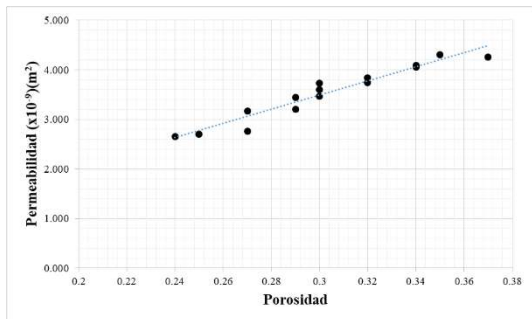


Figura 9. Permeabilidad axial como función de porosidad para celdas unitarias en serie.

### Estimaciones analíticas de la permeabilidad.

Para analizar si es posible estimar la permeabilidad de arreglos asimétricos de fibras UD. Se hizo el cálculo de la permeabilidad de manera analítica mediante 2 ecuaciones y los resultados se compararon con los resultados numéricos obtenidos. Para la primera estimación se consideró que la permeabilidad de un arreglo de dos fibras en serie es simplemente el promedio de las permeabilidades de cada celda unitaria componente, esto es dado en la Ecuación (4),

$$k = \frac{(k_1 + k_2)}{2} \tag{4}$$

Donde  $k$  es la permeabilidad del arreglo,  $k_1$  el valor de la permeabilidad individual de la celda unitaria en la posición 1 ( $n_1$ ) y  $k_2$  el valor de la permeabilidad individual de la celda unitaria en la posición 2 ( $n_2$ ).

En la Tabla 8, se muestran los valores obtenidos usando la Ecuación 4 para los arreglos analizados.

Permeabilidad (x10 <sup>-11</sup> ) (m <sup>2</sup> )					
n <sub>1</sub> /n <sub>2</sub>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	5.205	-	-	-	-
0.2	5.515	5.825	-	-	-
0.3	5.698	6.008	6.191	-	-
0.4	5.821	6.132	6.314	6.438	-
0.5	5.900	6.211	6.393	6.517	6.596

Tabla 8. Permeabilidad transversal mediante ecuación de promedio.

Para este caso y para los siguientes, el error asociado se estimó de la siguiente manera.

$$Error (\%) = \left| \frac{valor\ estimado - valor\ real}{valor\ real} \right| \times 100 \tag{5}$$

Donde, el valor estimado es el valor de la permeabilidad numérica tomado de la Tabla 6, y el valor real es valor de permeabilidad correspondiente a la misma configuración y tomado de la Tabla 7.

En la Tabla 9, se muestra el porcentaje de error entre los resultados numéricos y el modelo analítico (Ecuación 4), como puede verse para la mayor parte de las configuraciones el error es pequeño y solo para algunas configuraciones este error es mayor al 10%.

Error (%)					
n <sub>1</sub> /n <sub>2</sub>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	0.055	-	-	-	-
0.2	8.383	15.731	-	-	-
0.3	3.389	9.935	0.623	-	-
0.4	5.265	11.802	0.262	0.066	-
0.5	7.291	13.124	0.980	0.282	0.270

Tabla 9. Porcentaje de error entre resultados numéricos y ecuación de promedio ( Ecuación 4).

Otra forma de obtener la permeabilidad transversal de manera teórica, se basó en la Ecuación (6) propuesta por los autores (Liu H. & Hwang W. 2012).

$$k = \frac{k_1 k_2 (L_1 + L_2)}{(L_1 k_2 + L_2 k_1)} \tag{6}$$

Donde la  $k$  representa la permeabilidad promedio del arreglo,  $k_1$  y  $L_1$  son la permeabilidad y longitud de la celda unitaria de manera individual en la posición 1 y  $k_2$  y  $L_2$  corresponden a la permeabilidad y la longitud de la celda unitaria individual en la posición 2. Las permeabilidades obtenidas usando la Ecuación 6, se muestran en la Tabla 10.



Permeabilidad ( $\times 10^{-11}$ ) ( $m^2$ )					
$n_1/n_2$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	<b>5.205</b>	-	-	-	-
0.2	5.498	<b>5.825</b>	-	-	-
0.3	5.655	6.002	<b>6.191</b>	-	-
0.4	5.756	6.116	6.312	<b>6.438</b>	-
0.5	5.818	6.187	6.387	6.516	<b>6.596</b>

Tabla 10. Permeabilidad transversal de celdas unitarias en serie, calculada mediante la Ecuación 6.

En la Tabla 11, se muestra el porcentaje de error, entre los datos numéricos y el modelo analítico (Ecuación 6). Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos con el método anterior.

Error (%)					
$n_1/n_2$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	0.055	-	-	-	-
0.2	8.092	15.731	-	-	-
0.3	2.660	9.851	0.623	-	-
0.4	4.190	11.581	0.224	0.066	-
0.5	5.984	12.789	0.880	0.268	0.270

Tabla 11. Porcentaje de error entre permeabilidad transversal numérica y permeabilidad mediante Ecuación 6.

De manera similar al caso de permeabilidad transversal, para el caso axial, se realizaron dos estimaciones mediante modelos analíticos y los resultados se compararon con los obtenidos numéricamente (Tabla 7).

En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos para el caso axial, usando la Ecuación 4 para los arreglos analizados, es decir tomando un promedio de permeabilidades.

Permeabilidad ( $\times 10^{-9}$ ) ( $m^2$ )					
$n_1/n_2$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	<b>1.910</b>	-	-	-	-
0.2	1.915	<b>1.919</b>	-	-	-
0.3	2.177	2.182	<b>2.444</b>	-	-
0.4	2.307	2.311	2.574	<b>2.703</b>	-
0.5	2.438	2.442	2.705	2.834	<b>2.965</b>

Tabla 12. Permeabilidad axial mediante ecuación de promedio.

En la Tabla 13 se presentan los errores asociados con esta estimación, los cuales como puede verse son bastante grandes.

Error (%)					
$n_1/n_2$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	30.701	-	-	-	-
0.2	29.339	28.009	-	-	-
0.3	27.057	26.538	26.284	-	-
0.4	25.331	24.968	25.540	25.005	-
0.5	23.359	23.357	24.326	24.147	23.722

Tabla 13. Porcentaje de error entre resultados numéricos de permeabilidad axial y ecuación de promedio (Ecuación 4).

La Ecuación 7 también fue propuesta por los autores (Liu H. & Hwang W. 2012) para el cálculo de la permeabilidad axial,

$$k = \frac{A_1 k_1 + A_2 k_2}{(A)} \quad (7)$$

Donde  $k$  es la permeabilidad longitudinal,  $A_1$  y  $k_1$  representan el área del tow y la permeabilidad longitudinal correspondientes a la celda unitaria en la primer posición de manera individual,  $A_2$  y  $k_2$  el área del tow y la permeabilidad correspondientes a la celda unitaria en la segunda posición de manera individual, y  $A$  la suma de las 2 áreas ( $A_1 + A_2$ ).

En Tabla 14, se muestran los valores obtenidos usando la Ecuación 7 para los arreglos analizados.

Permeabilidad ( $\times 10^{-9}$ ) ( $m^2$ )					
$n_1/n_2$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	1.910	-	-	-	-
0.2	1.915	1.919	-	-	-
0.3	2.177	2.181	2.444	-	-
0.4	2.307	2.311	2.573	2.703	-
0.5	2.438	2.442	2.704	2.834	2.965

Tabla 14. Permeabilidad axial mediante ecuación 7.

Finalmente, en la Tabla 15 se presentan los errores asociados con esta estimación, y como en el caso anterior los errores son bastante grandes.

Error (%)					
n <sub>1</sub> /n <sub>2</sub>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.1	30.701	-	-	-	-
0.2	29.339	28.009	-	-	-
0.3	27.057	26.538	26.284	-	-
0.4	25.331	24.968	25.540	25.005	-
0.5	23.359	23.357	24.326	24.147	23.722

Tabla 15. Porcentaje de error entre resultados numéricos de permeabilidad axial y ecuación 7.

## Discusión y conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología computacional para la determinación de la permeabilidad en fibras unidireccionales, con secciones que se observan en arreglos reales de fibras y que difieren de las formas idealizadas, presentadas en varios trabajos.

Esta metodología se usó para determinar la permeabilidad transversal y longitudinal de geometrías representativas (celdas unitarias) y de sus combinaciones que dan lugar a arreglos asimétricos de fibras unidireccionales.

De acuerdo con los cálculos presentados se mostró que para el caso de permeabilidad transversal en arreglos asimétricos, esta puede estimarse a primera aproximación como el promedio de las permeabilidades de las celdas componentes con un error de alrededor del 5 % en promedio. De hecho solo en algunos casos el error es grande.

Por otro lado, para el caso de la permeabilidad axial de arreglos asimétricos, no se encontró una ecuación analítica que permita su estimación a partir de los valores de las celdas unitarias que la conforman. Por lo que este caso requiere un análisis más detallado, mismos que se presentarán en trabajos futuros.

## Agradecimientos

Jaqueline de los Angeles Viveros González, agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para sus estudios de maestría.

Escalante Velázquez, agradece al programa de investigadoras e investigadoras por México del CONAHCYT, proyecto 748.

## Referencias

1. Ali, M. A., Umer, R., Khan, K. A., Bickerton, S., & Cantwell, W. J. (2018). Non-destructive evaluation of through-thickness permeability in 3D woven fabrics for composite fan blade applications. *Aerospace Science and Technology*, 82–83(October), 520–533. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.10.003>.
2. Endruweit, A., Zeng, X., & Long, A. C. (2014). Multiscale modeling of combined deterministic and stochastic fabric non-uniformity for realistic resin injection simulation. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(1), 3–15. <https://doi.org/10.1179/2055035914y.0000000002>.
3. Endruweit, A., Zeng, X., Matveev, M., & Long, A. C. (2018). Effect of yarn cross-sectional shape on resin flow through inter-yarn gaps in textile reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 104, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.020>.
4. Liu, H. L., & Hwang, W. R. (2012). Permeability prediction of fibrous porous media with complex 3D architectures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 2030–2038. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.07.024>.
5. Pierce, R. S., & Falzon, B. G. (2017). Simulating Resin Infusion through Textile Reinforcement Materials for the Manufacture of Complex Composite Structures. *Engineering*, 3(5), 596–607. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.006>.
6. Porto, T. R. N., Barbosa de Lima, A. G., & de Amorim Júnior, W. F. (2018). Multiphase Fluid Flow in Porous-Fibrous Media: Fundamentals, Mathematical Modeling and Applications on Polymeric Composites Manufacturing. *Diffusion Foundations*, 20, 55–77. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/df.20.55>.
7. Wong, C. C., Long, A. C., Sherburn, M., Robitaille, F., Harrison, P., & Rudd, C. D. (2006). Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(6 SPEC. ISS.), 847–857. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.020>

# Instrumentos aplicados en métodos acústicos. Una revisión en frutos

Escutia Vargas Martha Elva, García Pérez Javier\*

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

[\\*javierincadd@gmail.com](mailto:*javierincadd@gmail.com)

## Resumen

El artículo tiene como propósito analizar los instrumentos en los prototipos utilizados en los métodos acústicos no destructivos, para medir la calidad de las propiedades físicas de las frutas, como son la madurez y la firmeza. A través de la revisión sistemática de literatura se exploran y comparan los métodos de evaluación de la calidad que se han empleado en estudios recientes teniendo como enfoque los métodos acústicos. Para ello, se utilizó la metodología *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (PRISMA), que sigue un proceso basado en cuatro fases: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. Después de aplicar los criterios para la selección de documentos en las bases de datos de ScienceDirect y Google Scholar, se consideraron los artículos más relevantes para su análisis. Los resultados muestran que la técnica mayormente utilizada ha sido la acústica, y que la evaluación de la calidad se orienta hacia la firmeza. Se concluye que el método acústico es prometedor, pero se requiere mayor estudio que permita su implementación industrial. Como línea futura de investigación se destaca la necesidad de analizar los instrumentos portátiles utilizados como métodos acústicos no destructivos para determinar la calidad deseada de la fruta.

**Palabras clave:** método acústico, no destructivo, frutas, calidad, revisión de literatura

## Abstract

The purpose of the article is to analyze the instruments in the prototypes used in non-destructive acoustic methods, to measure the quality of the physical properties of the fruits, such as ripeness and firmness. Through systematic literature review, the quality evaluation methods employed in recent studies are explored and compared, focusing on acoustic methods. For this, the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses (PRISMA) methodology was used, which follows a process based on four phases: identification, screening, eligibility, and inclusion. After applying criteria for document selection in ScienceDirect and Google Scholar databases, the most relevant articles for analysis were considered. The results show that the most used technique has been the acoustic, and that the quality evaluation is oriented towards firmness. It is concluded that the acoustic method is promising, but further study is required to allow its industrial implementation. As a future line of research, the need to analyze portable instruments used as non-destructive acoustic methods to determine the desired fruit quality is highlighted.

**Keywords:** acoustic method, non-destructive, fruits, quality, literature review

---

### Artículo arbitrado

---

Recibido:

16 de febrero de 2024

Aceptado:

1 de marzo de 2024

## Introducción

La seguridad alimentaria a nivel mundial se está viendo amenazada por la gran cantidad de alimentos desperdiciados a lo largo de la cadena de producción, procesamiento, comercialización y consumo. El desperdicio de frutas sobresale como un punto crítico en Asia, América Latina y Europa, ya que casi la mitad de las frutas y verduras producidas en estas regiones se desechan (FAO et al., 2022). Durante la producción de frutas, el momento de la cosecha es crucial para garantizar que se cumple con las especificaciones comerciales, ya que las frutas demasiado maduras o poco maduras tienen un valor más bajo o incluso nulo, representando una pérdida económica significativa (Li et al., 2018). Por lo tanto, una de las preocupaciones actuales de proveedores y consumidores es mantener la calidad de la fruta.

Recientemente, ha habido un creciente interés sobre los diferentes métodos para acceder a los parámetros de calidad de la fruta (Fathizadeh et al., 2021). Con el rápido desarrollo de la ciencia y la tecnología se han explorado nuevos métodos de detección no destructivos que permiten extraer estas propiedades y superar los desafíos de los problemas existentes en los métodos destructivos (Srivastava & Sadistap, 2018).

Los métodos destructivos suelen encontrar las propiedades de las frutas produciendo daños materiales, lo que no sucede con los métodos no destructivos (Ding et al., 2020). Es decir, el análisis se refiere a las pruebas en la superficie de las frutas y hortalizas sin ninguna técnica que dañe su aspecto y calidad (El-Mesery et al., 2018). Existen tres grupos de métodos no destructivos: los ópticos, los analíticos y los acústicos (ver Tabla 1). Los primeros se refieren a la medición del espectro mientras que los segundos estudian la composición; no obstante, esta revisión de centra en los métodos acústicos en donde la característica analizada es el impulso acústico resonante de la fruta (El-Mesery et al., 2019). Se trata de métodos robustos, por lo que han sido ampliamente utilizados para determinar la firmeza de los productos agrícolas (Fathizadeh et al., 2020), para obtener información sobre la madurez, calidad, tiempo de vida y probabilidad de posibles daños fisiológicos (Ding et al., 2021).

Generalmente, el método acústico utiliza la frecuencia natural obtenida del registro de un sonido producido al excitar la fruta con un golpe o por módulo forzado, para que posteriormente la señal sea captada por un dispositivo con o sin contacto y mandarla al procesador de señales; posteriormente, se aplica la transformada de Fourier en la señal registrada para obtener el espectro de frecuencia y así poder evaluar la calidad interna y la madurez de las frutas (Fathizadeh et al., 2021, Opara & Pathare, 2014).

A partir de las señales de frecuencias de resonancia adquiridas en las mediciones de las vibraciones es posible obtener las características, ya que esta frecuencia está altamente relacionada con la elasticidad, la fricción interna, forma, tamaño y densidad del producto (Ding et al., 2021). Sin embargo, los resultados obtenidos son sensibles y dependen de varias características como la forma de la fruta, el ángulo de impacto y variaciones en la fruta, entre otros (Bashir et al., 2020).

Tabla 1. *Métodos no destructivos*

Métodos no destructivos		
Ópticos	Analíticos	Acústicos
• Visión artificial	• Nariz electrónica	• Sonido
• Espectroscopia visible	• Lengua electrónica	• Ultrasonido
• Infrarrojo cercano		
• Imágenes hiperespectrales		
• Imágenes multiespectrales		
• Imágenes de fluorescencia		
• Rayos X		
• Método inducido por láser		

Fuente: Elaboración propia.

Algunas investigaciones se centran en diseñar nuevos instrumentos para monitorear la calidad de los alimentos y otros estudian cómo se utiliza este método en productos cárnicos, frutas y vegetales (Abasi et al., 2018; Fathizadeh et al., 2020). Así mismo, se han analizado las ventajas, la metodología y rangos de

frecuencia utilizados en algunos productos agrícolas (Srivastava & Sadistap, 2018). No obstante, hace falta un mayor análisis sobre qué elementos se están utilizando para la creación de los prototipos en las diferentes investigaciones. Por lo tanto, esta revisión de literatura tiene como objetivo analizar los instrumentos utilizados en las investigaciones experimentales donde se aplican los métodos acústicos para medir la calidad de las propiedades físicas de las frutas, como son la madurez y la firmeza.

Este documento se estructura en cuatro secciones; la primera presenta la introducción con un contexto general del tema; la segunda sección menciona la metodología que describe el proceso que siguió la investigación; la tercera sección expone el análisis de contenido de los artículos, y finalmente, las conclusiones.

## Metodología

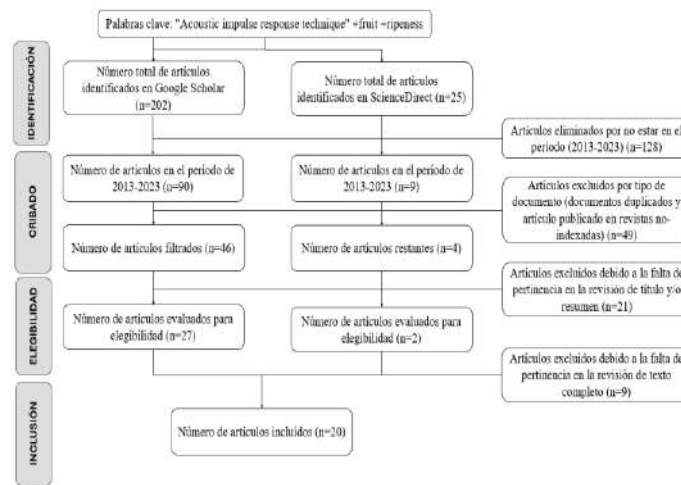
Esta revisión sistemática de literatura siguió los pasos de la metodología *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (PRISMA), la cual incluye cuatro pasos específicos: identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de las investigaciones más relevantes sobre el objeto de estudio (Yepes et al., 2021). Previamente se establecieron criterios de inclusión y exclusión que se detallarán en cada paso. Para la fase de búsqueda se utilizó la plataforma *Google Scholar* y *ScienceDirect* por su amplia cobertura en documentos académicos en el caso del primero y por su fiabilidad en el caso del segundo; se identificaron 227 artículos en total a través de la ecuación de búsqueda con palabras clave en inglés: (“Acoustic impulse response technique” +fruits +ripeness).

Posteriormente, la fase de cribado consistió en colocar el periodo considerando las publicaciones de cinco años atrás (2018 a 2023); no obstante, solo 49 documentos resultaron de la búsqueda, lo que reducía considerablemente el análisis y cumplimiento del objetivo; así fue, que se amplió el periodo por cinco años más (2013 a 2023), donde se obtuvieron 99 artículos. Esto permitió aplicar otros criterios de

exclusión como eliminar capítulos de libros, documentos repetidos, con acceso pagado (no proporcionados por los autores) y de revistas no indexadas. Con estos criterios se obtuvieron 50 artículos. Una vez realizado lo anterior, se llevó a cabo la fase de elegibilidad, examinando la pertinencia de los estudios por título y resumen; se eliminaron aquellos artículos que no tenían relación con el tema de la presente revisión, obteniéndose un total de 29 documentos.

Subsecuentemente se realizó la lectura de texto completo determinando que nueve de ellos no tenían pertinencia al tema, por lo que al final se seleccionaron 20 artículos. La Figura 1 muestra de forma gráfica el procedimiento seguido para la obtención de información para la elaboración de la presente revisión.

Figura 1. Diagrama PRISMA

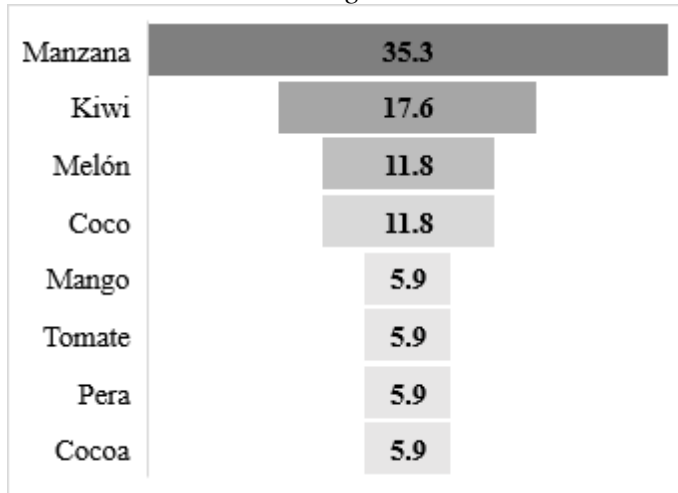


Fuente: Elaboración propia

## Resultados

De los 20 artículos revisados, tres de ellos corresponden a revisiones de literatura y 17 corresponden a investigaciones empíricas. 35.3% de las investigaciones aplicaron las técnicas para evaluar la calidad de la manzana, 17.6% de kiwi, 11.8% del melón, 11.8 % del coco, 5.9% del mango, 5.9% del tomate, 5.9% de pera y 5.9% de cocoa (ver Figura 2).

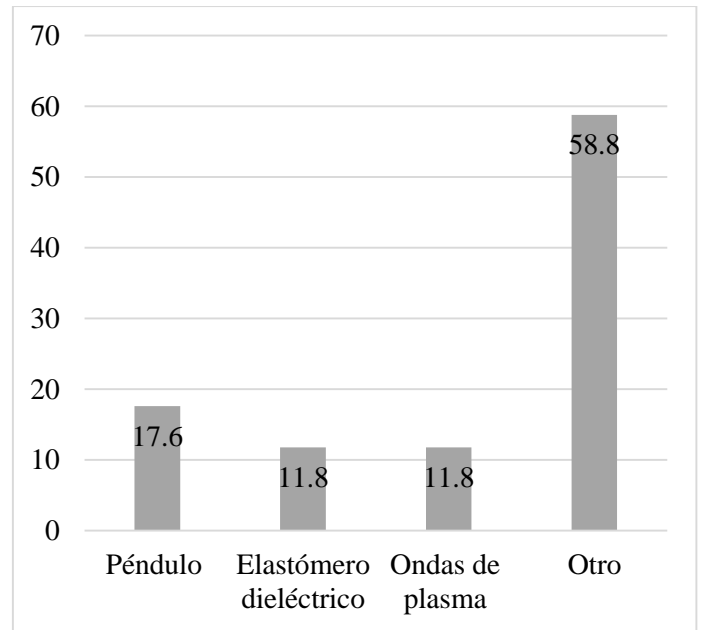
Figura 2. Porcentajes de frutas utilizadas en la investigación



Fuente: Elaboración propia.

La generalidad de los estudios evidencia la aplicación de la técnica de respuesta de impulso acústico, la cual se utiliza con un instrumento para golpear o excitar la fruta (martillo, palo, péndulo, bocina, etc.) y un módulo de adquisición de señal (acelerómetro, LDV, micrófono, etc.) para posteriormente realizar el análisis de esta señal, y así, poder obtener el parámetro buscado (Karthickumar et al., 2018; Li et al., 2018). Para la excitación de la fruta, 17.6% de las investigaciones utilizaron péndulos, 11.8% utilizó un actuador elastómero dieléctrico; 11.8% utilizó ondas de plasma inducidas por láser y el resto empleó otro tipo de instrumento (ver Figura 3). En la Tabla 2 se presenta un resumen de la información recolectada de los diferentes textos revisados.

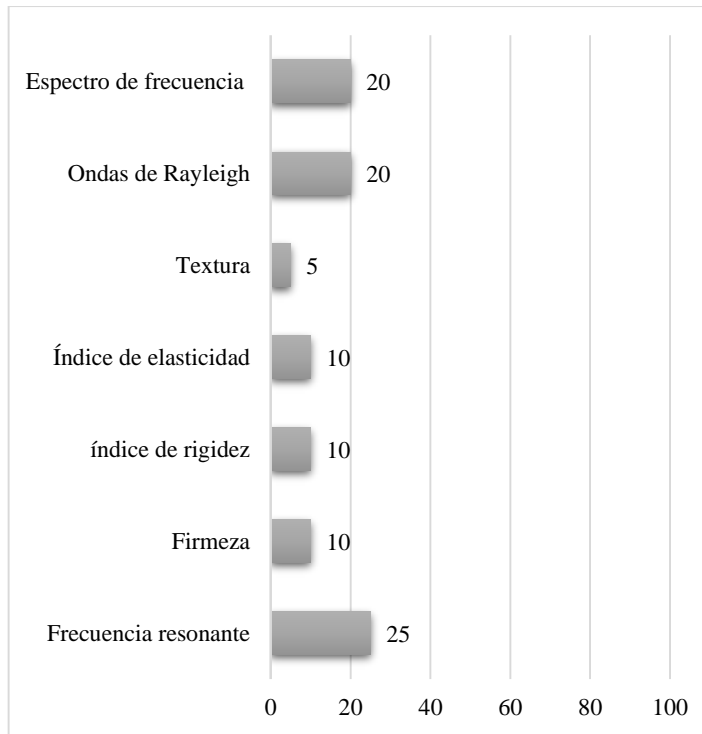
Figura 3. Porcentajes de instrumentos de excitación utilizados



Fuente: de elaboración propia

Dentro de los parámetros buscados para determinar la calidad de la fruta se encuentran la madurez, la firmeza, la rigidez, lo crujiente de la fruta y la jugosidad (Li et al., 2016); sin embargo, para determinar la madurez, 100% de las investigaciones determinan la frecuencia de resonancia para después obtener el parámetro de interés como puede ser el índice de firmeza (25%), coeficiente o índice de rigidez (10%), índice de elasticidad (10%), textura (10%), ondas de Rayleigh (5%) o, simplemente, utilizar el espectro de frecuencia obtenido para analizar los datos (20%). De igual forma, la frecuencia de resonancia se utiliza para generar modelos de clasificación y predecir la madurez de las frutas sin tener que destruirlas (20%) (ver Figura 4).

Figura 4. Porcentajes de parámetros de interés



Fuente: de elaboración propia

En cuanto a las tendencias obtenidas de los parámetros determinados, se obtuvo que, en la manzana, el mango, la pera, el kiwi, la cocoa, el tomate y el melón el parámetro tiende a disminuir conforme aumenta la madurez o el tiempo de almacenamiento. Sin embargo, en la investigación espectral disminuye conforme el coco es en el coco más maduro. En el resto de las frutas el mayor espectro de frecuencia se encuentra cuando estas son menos maduras.

Tabla 2. *Sistemas de respuesta de impulso acústico*

Fruta	Excitador	Receptor de señal	Parámetro resultante	Tendencia encontrada	Futuras investigaciones	Referencia
Manzana	Actuador elastómero dieléctrico	LDV	Índice de firmeza	La frecuencia tiende a disminuir con el tiempo	Correlación entre firmeza obtenida por vibración y obtenida por durómetro	Hiruta et al. (2021)
Manzana	Péndulo mecánico	Micrófono Acelerómetro	Índice de firmeza	El índice de firmeza decrece con el tiempo de almacenamiento	Evaluación de la firmeza utilizando métodos de inteligencia artificial y técnica de fusión de datos	Fathizadeh et al. (2020)
Manzanas exóticas	Martillo de teflón	Micrófono	Frecuencia fundamental y el espectro de potencia	La señal acústica disminuye proporcionalmente con la maduración	NR	Wani et al. (2023)
Manzana	Módulo de impacto	Módulo de adquisición de señal	Coefficiente de elasticidad Propiedades de textura	NR	Mayor desarrollo de este método	Fathizadeh et al. (2021)

Manzana	Palo de madera	Transmisor	Coefficiente de rigidez	No hay diferencia en la frecuencia de resonancia entre temporadas de cosecha	Explicar la importancia de los parámetros acústicos individuales	Jemrić et al. (2016)
Manzana	Ondas de plasma inducidas por láser	LDV	Firmeza	La firmeza tiende a disminuir al aumentar el tiempo de almacenamiento	Determinación de los puntos de excitación y medición deseados	Hosoya et al. (2017)
Coco	Motor vibrador tipo moneda de plata	Sensor de vibración 801S	Comparación de modelos clasificadores. ANN obtuvo mayor exactitud (93.3%)	La frecuencia disminuye con forme aumenta la madurez	Considerar la duración del almacenamiento y tener el cuanta propiedades físicas y químicas	Fadchar & Cruz (2020a)
Coco	Motor servo	Sensor de vibración interconectado con Arduino	Clasificación de madurez ANN con exactitud de 96%	La magnitud espectral disminuye conforme la madurez disminuye	Más evaluaciones sobre eficiencia y funcionalidad del método	Fadchar & Cruz (2020b)
Kiwi	Agitador	Acelerómetro LDV	Índice de elasticidad	La elasticidad decrece con forme aumenta el tiempo de almacenamiento	NR	Terasaki et al. (2013)
Kiwi	Dispositivo piezoeléctrico	Dispositivo piezoeléctrico	Índice de rigidez	El índice de rigidez disminuye al aumentar el tiempo de almacenamiento	Implementar el método de forma automatizada en el campo industrial	Macrelli et al. (2013)
Kiwi	"GÜSS Fruit Texture Analyser" y "Aweta Firmness System"	Acoustic	Firmeza	La firmeza tiende a disminuir al aumentar el tiempo de almacenamiento	Investigaciones adicionales de los procesos físicos y químicos que causa el método	Li et al. (2016)
Melón	Barra de metal conectado a un agitador	LDV	Velocidad de onda acústica superficial	La velocidad tiende a disminuir al madurar la fruta. La frecuencia de resonancia y la firmeza disminuyen durante la maduración.	Utilizar una excitación inducida por láser de ondas acústicas superficiales	Choi et al. (2022)



Melón	Barra cilíndrica	Micrófono	Frecuencia resonante	La frecuencia resonante disminuye a mayor madurez	Desarrollo del método para aumentar la precisión de la evaluación y predicción	Karthickumar et al. (2018)
Pera	Actuador elastómero dieléctrico	LDV	Índice de firmeza	El índice de firmeza decrece con el tiempo de almacenamiento	Reemplazar el LDV con sensores de elastómero dieléctrico	Hiruta et al. (2021)
Mango	Ondas de plasma inducidas por láser	LDV	Velocidad de propagación de las ondas Rayleigh	La velocidad de propagación de las ondas disminuye a medida que aumenta el tiempo de almacenaje	Considerar más a detalle el punto donde se utilizará la onda de Raleigh	Arai et al. (2021)
Cocoa	Mano	Circuito piezoeléctrico conectado a un puerto de auriculares	Comparación de modelos clasificadores. SVM obtuvo mayor exactitud (95.72%)	La frecuencia resonante disminuye a mayor madurez	Método de detección de madurez en tiempo real para teléfonos móviles e investigación sobre la detección acústica en variedades de cacao	Arenga & Cruz (2017)
Tomate	Auriculares	Micrófono integrado a la cabeza de un estetoscopio	Comparación de modelos clasificadores. SVM obtuvo mayor exactitud.	La amplitud de la señal decrece con el tiempo de almacenamiento	Identificar la causa de variación de la respuesta acústica	Kataoka et al. (2016)
NR	Instrumento para golpear la muestra	NR	Espectro de frecuencia	NR	NR	Lakshmi et al. (2017)
NR	Péndulo con una adaptación esférica	Micrófono Sensores de película	Textura	NR	Aumentar la aplicación y precisión de la técnica, así como velocidad de procesamiento de datos	Aboonajmi et al. (2015)
NR	Martillo Palo Péndulo Vibrador Bocina Generador	Acelerómetro LDV Sensor piezoeléctrico Micrófono	Madurez Clasificación de madurez Firmeza Rigidez Crujiente Jugosidad	NR	Velocidad de detección rápida	Zhang et al. (2017)

vibrador  
piezoeléctrico

Nota: NR: No referenciado  
Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Actualmente la cantidad de alimentos, principalmente frutas y verduras, que se desperdician en el mundo es preocupante, por lo que se ha optado por investigar métodos que permitan determinar la calidad de estos alimentos y así poder evitar que se cosechen a destiempo, provocando que el alimento sea rechazado por el consumidor. La calidad de las frutas puede ser valorada a través de métodos destructivos y no destructivos. Los métodos acústicos están recibiendo mayor atención debido a que proporciona información certera de las propiedades de las frutas como la firmeza, madurez, defectos internos y contenido de azúcar logrando con esto, evaluar la calidad del producto evitando así que se coseche en un momento inadecuado y evitando que se desperdicie.

El método acústico ha resultado ser un método sencillo y, dependiendo de los instrumentos utilizados resulta ser económico, por lo que varios científicos han optado por emplearlo para determinar diferentes parámetros de calidad, proporcionando información sobre el estado de las frutas y en algunos casos poder clasificarlas para poder llevar únicamente al mercado aquellas que están listas para su consumo. Sin embargo, de acuerdo con Zhang et al. (2017), Macrelli et al. (2017) y Arenga y Cruz (2017) se requieren avances en el área comercial para poder desarrollar dispositivos móviles y dispositivos automáticos que trabajen en las líneas industriales. Por su parte, Karthickumar et al. (2018), Fadchar & Cruz (2020b), Fathizadeh et al. (2021) y Aboonajmi et al. (2015) mencionan que es necesario aumentar la precisión, evaluación y rapidez del método acústico. Además, Fadchar & Cruz (2020a) y Li et al. (2016) proponen se tome en cuenta las propiedades físicas y químicas al momento de someter a prueba la fruta.

Es recomendable hacer estudios comparativos para dar cuenta sobre los métodos y parámetros obtenidos.

Las limitaciones del estudio giran en torno al uso único de una fuente de información. En estudios futuros se podría complementar la búsqueda de documentos con otras bases de datos. Por ende, para avanzar en la comprensión de estas técnicas, una futura investigación podría abordar estos vacíos de conocimiento.

## Referencias

- Abasi, S., Minaei, S., Jamshidi, B., & Fathi, D. (2018). Dedicated non-destructive devices for food quality measurement: A review. *Trends, Food Science & Technology*, 78, 197-205.
- Aboonajmi, M., Jahangiri, M., & Hassan-Beygi, S. R. (2015). A review on application of acoustic analysis in quality evaluation of agro-food products. *Journal of food processing and preservation*, 39(6), 3175-3188.
- Arai, N., Miyake, M., Yamamoto, K., Kajiwara, I., & Hosoya, N. (2021). Soft mango firmness assessment based on Rayleigh waves generated by a laser-induced plasma shock wave technique. *Foods*, 10(2), 323.
- Arenga, D. Z. H., & Cruz, J. C. D. (2017, December). Ripeness classification of cocoa through acoustic sensing and machine learning. In 2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM) (pp. 1-6). IEEE.
- Bashir, S., Jabeen, A., Makroo, H. A., & Mehraj, F. (2020). Application of computer vision system in fruit quality monitoring. In *Sensor-Based Quality Assessment Systems for Fruits and Vegetables* (pp. 267-290). Apple Academic Press.
- Choi, P. K., Sugashima, Y., & Ikeda, T. (2022). Firmness evaluation of watermelon and melon using velocity dispersion of surface-acoustic-wave. *Japanese Journal of Applied Physics*, 61(9), 097001.
- Ding, C., Feng, Z., Wang, D., Cui, D., & Li, W. (2021). Acoustic vibration technology: Toward a promising fruit quality detection method. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1655-1680.
- Ding, C., Wu, H., Feng, Z., Wang, D., Li, W., & Cui, D. (2020). Online assessment of pear firmness by acoustic vibration analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 160, 111042.
- El-Mesery, H. S., Mao, H., & Abomohra, A. E. F. (2019). Applications of non-destructive technologies for agricultural and food products quality inspection. *Sensors*, 19(4), 846.
- Fadchar, N. A., & Cruz, J. C. D. (2020a, April). Design and Development of Neural Network—Based Coconut Maturity

- Detector Using Sound Signatures. In 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) (pp. 927-931). IEEE.
- Fadchar, N. A., & Cruz, J. C. D. (2020b, February). A non-destructive approach of young coconut maturity detection using acoustic vibration and neural network. In 2020 16th IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA) (pp. 136-137). IEEE.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO (2022). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable*, FAO. Rome.
- Fathizadeh, Z., Aboonajmi, M., & Beygi, S. R. H. (2020a). Nondestructive firmness prediction of apple fruit using acoustic vibration response. *Scientia Horticulturae*, 262, 109073.
- Fathizadeh, Z., Aboonajmi, M., & Hassan-Beygi, S. R. (2021). Nondestructive methods for determining the firmness of apple fruit flesh. *Information Processing in Agriculture*, 8(4), 515-527
- Hiruta, T., Hosoya, N., Maeda, S., & Kajiwara, I. (2021). Experimental evaluation of frequency response and firmness of apples based on an excitation technique using a dielectric elastomer actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 330, 112830.
- Hiruta, T., Sasaki, K., Hosoya, N., Maeda, S., & Kajiwara, I. (2021). Firmness evaluation of postharvest pear fruit during storage based on a vibration experiment technique using a dielectric elastomer actuator. *Postharvest Biology and Technology*, 182, 111697.
- Hosoya, N., Mishima, M., Kajiwara, I., & Maeda, S. (2017). Non-destructive firmness assessment of apples using a non-contact laser excitation system based on a laser-induced plasma shock wave. *Postharvest Biology and Technology*, 128, 11-17.
- Jemrić, T., Buhin, J., Fruk, M., Gašpar, L., Mrčela, A., Važić, T., ... & Vuković, M. (2016). Analysis of Acoustic Impulse Method for Determining Firmness and other Quality Parameters of Gloster Apple. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(3), 167-171.
- Karthickumar, P., Sinija, V. R., Alagusundaram, K., & Yadav, B. K. (2018). Evaluation of muskmelon ripening based on acoustic response. *Journal of Applied Horticulture*, 20(2), 125-128.
- Kataoka, H., Ijiri, T., White, J., & Hirabayashi, A. (2016, December). Acoustic probing to estimate freshness of tomato. In 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA) (pp. 1-5). IEEE.
- Lakshmi, S., Pandey, A. K., Ravi, N., Chauhan, O. P., Gopalan, N., & Sharma, R. K. (2017). Non-destructive quality monitoring of fresh fruits and vegetables. *Defence Life Science Journal*, 2(2), 103-110.
- Li, B., Lecourt, J., & Bishop, G. (2018). Advances in non-destructive early assessment of fruit ripeness towards defining optimal time of harvest and yield prediction, a review. *Plants*, 7(1), 3.
- Li, H., Pidakala, P., Billing, D., & Burdon, J. (2016). Kiwifruit firmness: Measurement by penetrometer and non-destructive devices. *Postharvest Biology and Technology*, 120, 127-137.
- Macrelli, E., Romani, A., Paganelli, R. P., Sangiorgi, E., & Tartagni, M. (2013). Piezoelectric transducers for real-time evaluation of fruit firmness. Part I: Theory and development of acoustic techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 201, 487-496.
- Magwaza, L. S., & Tesfay, S. Z. (2015). A review of destructive and non-destructive methods for determining avocado fruit maturity. *Food and bioprocess technology*, 8(10), 1995-2011.
- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 9–24. doi:10.1016/j.postharvbio.2013.12.009
- Srivastava, S., & Sadistap, S. (2018). Non-destructive sensing methods for quality assessment of on-tree fruits: a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(1), 497-526.
- Terasaki, Shoji; Sakurai, Naoki; Kuroki, Shinichiro; Yamamoto, Ryoichi; Nevins, Donald J. (2013). A new descriptive method for fruit firmness changes with various softening patterns of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, 86, (85–90).
- Wani, N. R., Hussain, S. Z., Bej, G., Naseer, B., Beigh, M., Fayaz, U., ... & Wani, F. J. (2023). Predicting the optimum harvesting dates for different exotic apple varieties grown under North Western Himalayan regions through acoustic and machine vision techniques. *Food Chemistry: X*, 100754.
- Zhang, W., Lv, Z., & Xiong, S. (2017). Nondestructive quality evaluation of agro-products using acoustic vibration methods—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–12.



**CONCYTEQ**

CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
DEL ESTADO DE GUERRERO