

EPISTEMUS

CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SALUD

UNIVERSIDAD DE SONORA, JULIO-DICIEMBRE DE 2022, NÚMERO 33

ISSN: 2007-8196



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Urbanismo, Propiedades animales y Compuestos bioactivos

CTS EPISTEMUS

INVESTIGACIÓN

Análisis de la demanda de un transporte público en Ciudad de México.

Análisis de la conectividad urbana de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

DESDE LA ACADEMIA

Las redes de Petri y su adopción en programas de la Universidad de Sonora.

El desarrollo de la Astrobiología como ciencia.

Modelo computacional de la formación de cúmulos proto-estelares: aplicación a "the Brick".

Aplicaciones tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria.

Aprendiendo a revalorizar los subproductos y su aplicación en productos cárnicos.

Radiosensibilidad en cáncer de mama asociado al origen étnico.

Árboles de decisión para clasificación de vacas lecheras usando información genética.

Estado actual del conocimiento de la medusa bola de cañón (*Stomolophus meleagris*).

El potencial farmacológico de venenos de serpientes de Sonora, México.

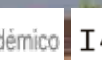
Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar.

Catalizadores de tres vías: historia, funcionamiento y ventajas ambientales.

Recientes aplicaciones de la fluorescencia de la clorofila en los cultivos vegetales.

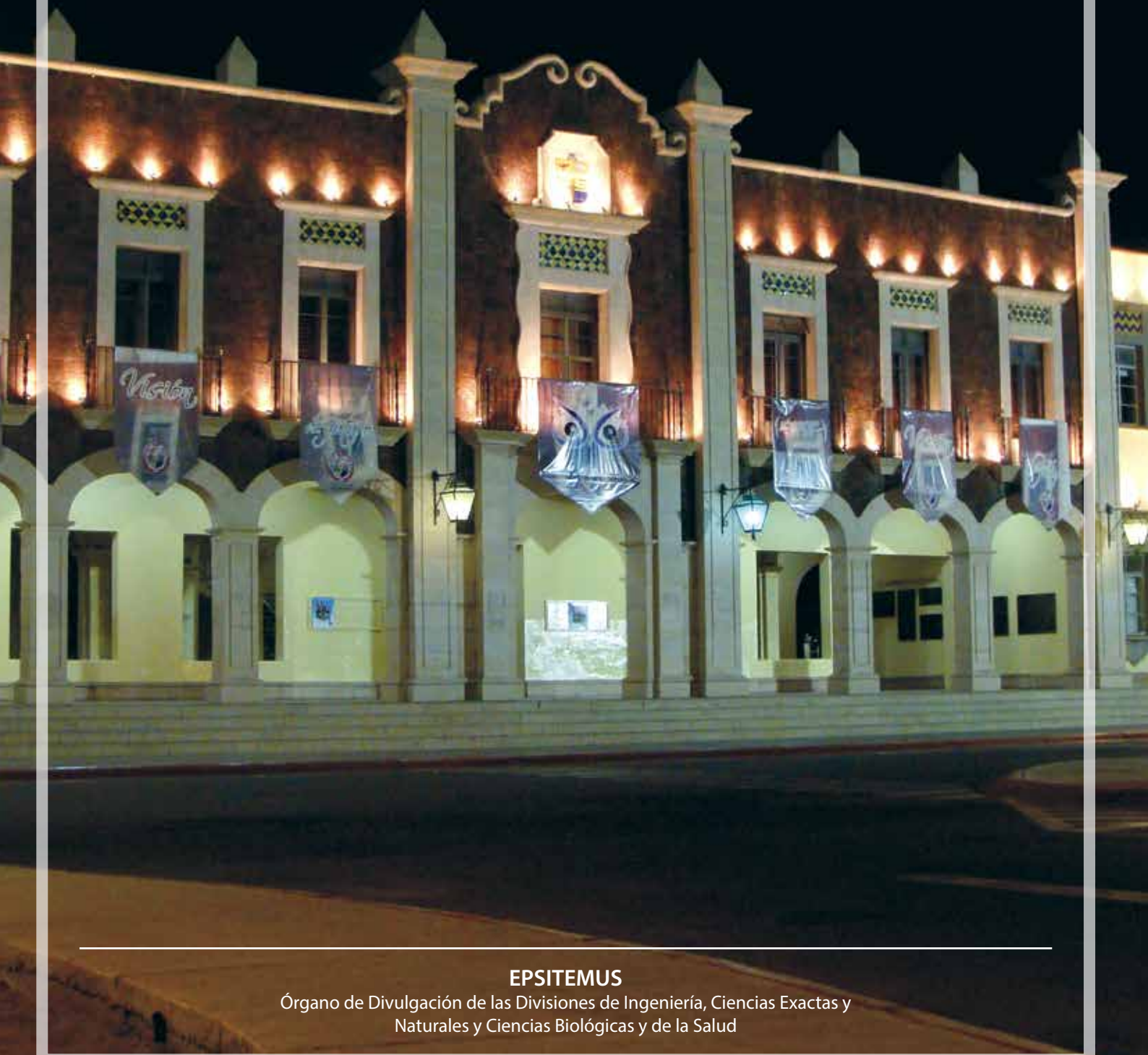
Orujo de uva: Más que un residuo, una fuente de compuestos bioactivos.

Indexada en:





**“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”**



EPSITEMUS

Órgano de Divulgación de las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y
Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud



CONTENIDO

CONTENIDO	1
DIRECTORIO	2
EDITORIAL	3
BASES	4

INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE UN TRANSPORTE PÚBLICO EN CIUDAD DE MÉXICO HEBER GUILLERMO GONZALEZ QUIROGA, ESTHER SEGURA PÉREZ, WULFRANO GOMEZ GALLARDO	7
---	---



ANÁLISIS DE LA CONECTIVIDAD URBANA DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA G. RAMÍREZ-URIBE, J. F. GARCÍA ARVIZÚ, A. OJEDA DE LA CRUZ, J. QUINTANA PACHECO, I. MIRANDA PASOS	16
---	----

DESDE LA ACADEMIA



LAS REDES DE PETRI Y SU ADOPCIÓN EN PROGRAMAS DE LA UNIVERSIDAD DE SONORA ELEAZAR JIMENEZ SERRANO	26
---	----



EL DESARROLLO DE LA ASTROBIOLOGÍA COMO CIENCIA SEBASTIÁN ALEJANDRO VALENCIA MEZA, ANELY ORTIZ ALEGRIÁ	33
--	----



MODELO COMPUTACIONAL DE LA FORMACIÓN DE CÚMULOS PROTO-ESTELARES: APLICACIÓN A "THE BRICK" GUILLERMO ARREAGA GARCÍA	39
--	----

CTS-EPISTEMUS



APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LAS NANOPARTÍCULAS EN LA MEDICINA E INDUSTRIA. R. BRITTO HURTADO, M. CORTEZ-VALADEZ, M. FLORES-ACOSTA	46
---	----



APRENDIENDO A REVALORIZAR LOS SUBPRODUCTOS Y SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS CÁRNICOS. SILVIA BETZABE ORDAZ- RODRÍGUEZ, LUCÍA ABADÍA- GARCÍA, AURORA FEMAT-DÍAZ, MAGDALENA MENDOZA-SÁNCHEZ	55
---	----



RADIOSENSIBILIDAD EN CÁNCER DE MAMA ASOCIADO AL ORIGEN ÉTNICO ARACELY ANGULO-MOLINA, EFRAÍN URRUTIA BAÑUELOS, ERIKA SILVA-CAMPA, KARLA SANTACRUZ-GÓMEZ, MONICA ACOSTA-ELÍAS	63
--	----



ÁRBOLES DE DECISIÓN PARA CLASIFICACIÓN DE VACAS LECHERAS USANDO INFORMACIÓN GENÉTICA EDELMIIRA RODRÍGUEZ ALCÁNTAR	69
---	----



ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DE LA MEDUSA BOLA DE CAÑÓN (STOMOLOPHUS MELEAGRIS) SASTRÉ-VELÁSQUEZ, RODRÍGUEZ-ARMENTA, MINJAREZ-OSORIO, DE LA RE-VEGA	75
--	----



EL POTENCIAL FARMACOLÓGICO DE VENENOS DE SERPIENTES DE SONORA, MÉXICO JORGE JIMÉNEZ CANALE, ENRIQUE FERNANDO VELÁZQUEZ CONTRERAS, JOSÉ ANDREI SARABIA SAINZ	84
---	----



SUELOS AGRÍCOLAS Y METALES PESADOS, UNA RELACIÓN TÓXICA QUE SE PUEDE REMEDIAR LUIS ANTONIO LOYDE DE LA CRUZ, BLANCA GONZÁLEZ MÉNDEZ, ANA MARTHA CRUZ AVALOS, RENÉ LOREDO PORTALES	93
---	----



CATALIZADORES DE TRES VÍAS: HISTORIA, FUNCIONAMIENTO Y VENTAJAS AMBIENTALES SOFÍA NAVARRO-ESPINOZA, DIANA MEZA-FIGUEROA, MARTÍN PEDROZA-MONTERO, DIEGO SOTO-PUEBLA	99
---	----



RECIENTES APLICACIONES DE LA FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA EN LOS CULTIVOS VEGETALES ADALBERTO BENAVIDES-MENDOZA, NAZARIO FRANCISCO-FRANCISCO	106
--	-----



ORUJO DE UVA: MÁS QUE UN RESIDUO, UNA FUENTE DE COMPUESTOS BIOACTIVOS MADELINA LÓPEZ-ASTORGA, CLAUDIA CELESTE MOLINA-QUIJADA, MARIBEL OVANDO-MARTÍNEZ, MARCOS LEON-BEJARANO	115
---	-----

EPISTEMUS

UNIVERSIDAD DE SONORA

EPISTEMUS. Año 16, No. 33, julio-diciembre 2022 es una publicación semestral arbitrada y es editada por la Universidad de Sonora a través de las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud. Blvd. Luis Encinas y Blvd. Rosales s/n, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo Sonora; Tel. (662) 2592157, (662)2592183, www.epistemus.uson.mx. Editor ejecutivo: Dr. José Luis Ochoa Hernández. Co-Editores Dr. Raúl Sánchez Zeferino y Dr. José Manuel Galván Moroyoqui. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-082917561100-102. ISSN: 2007-8196 otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: equipo interno de la Editorial de Epistemus de la Universidad de Sonora; fecha de la última modificación 31 de enero del 2023.

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 presente publicación siempre y cuando se cite plenamente la fuente.

Información del contacto institucional de la publicación: Universidad de Sonora, Unidad Regional Centro, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México. Tel. (662)2592157, Correo electrónico: epistemus@unison.mx, At'n. Dr. José Luis Ochoa Hernández, Editor ejecutivo.

EPISTEMUS está Indexada en: Scientific Electronic Library Online (SciELO México), en el portal especializado en Revistas Científicas y Académicas publicadas en América Latina y el Caribe (Biblat), en el portal de difusión de la Fundación Dialnet de la Universidad de la Rioja, España, Directory of Open Access Journal (DOAJ), en E-Z3 de Alemania, en el Google Académico, I40C – Crossref, el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX), Base de datos MIAR, en la base de datos Open Aire de Europa, en el Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias (PERIODICA), en los repositorios de la Unison CRIS-Unison, Catálogo de Libros y Ciencia Unison.

Y en los sitios de consulta / repositorios AURA, EZ3, Google Académico, I40C, MIAR, OpenAire, Catálogo de Libros de la UniSon, Repositorio Institucional CRIS-UNISON y Ciencia Unison y es firmante de la Declaración DORA.

REVISTA EPISTEMUS

Universidad de Sonora
Unidad Regional Centro, Blvd. Luis Encinas y
Rosales, s/n, Col. Centro, C.P. 83000,
Hermosillo, Sonora, México.
Teléfono: (662) 259 2157.
Correo: epistemus@unison.mx
Atn. Dr. José Luis Ochoa Hernández
Editor Ejecutivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Dra. María Rita Plancarte Martínez
Rector

Dr. Ramón Enrique Robles Zepeda
Secretaría General Académica

Dra. Rosa María Montesinos Cisneros
Secretaría General Administrativa

Dra. María Rita Plancarte Martínez
Vicerrectora de la Unidad Regional Centro

Dr. Rodolfo Basurto Álvarez
Director de Vinculación y Difusión

DIRECCIÓN GENERAL

Dr. Martín Antonio Encinas Romero

Dr. Rodrigo Melendrez Amavizca

Dr. Juan Carlos Gálvez Ruíz

EDITOR EJECUTIVO

Dr. José Luis Ochoa Hernández

Departamento de Ingeniería Industrial - Universidad
de Sonora. epistemus@unison.mx

SECRETARIO EPISTEMUS

Dr. Francisco Javier Cuen Romero

[franciscojavier.cuen \(@\) unison.mx](mailto:franciscojavier.cuen (@) unison.mx)

Departamento de Geología - Universidad de Sonora

CORRECTOR DE ESTILO

Dra. Esther Hugues Santa Cruz

Departamento de Lenguas Extranjeras - Universidad
de Sonora

Dra. Martha Olivia Ramírez Armenta

Departamento de Letras y Lingüística - Universidad
de Sonora

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Dra. Erika Silva Campa

Departamento de Investigación en Física -
Universidad de Sonora

Dr. Raúl Sánchez Zeferino

Departamento de Física - Universidad de Sonora

Dr. Francisco Javier Cuen Romero

Departamento de Geología - Universidad de Sonora

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

M.A. Jesús Fernando García Arvizu

Departamento de Ingeniería Civil y Minas -
Universidad de Sonora

Dr. José Luis Ochoa Hernández

Departamento de Ingeniería Industrial - Universidad
de Sonora

Dra. Ramona Guadalupe Martínez Meza

Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia -
Universidad de Sonora

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

Dra. Kadiya del Carmen Calderón Alvarado

Departamento de Investigación Científica y
Tecnológica - Universidad de Sonora

Dr. José Manuel Galván Moroyoqui

Departamento de Medicina y Ciencias de la Salud -
Universidad de Sonora

M.A. Rafael Retes López

Departamento de Agricultura y Ganadería -
Universidad de Sonora

DISEÑO GRÁFICO

L.D.G. José Benito Montaña Dórame

PÁGINA WEB

<http://www.epistemus.uson.mx/>

EPISTEMUS es la revista de la Universidad de Sonora, encargada de la divulgación y difusión de temas relacionados con las ciencias exactas y naturales, la ingeniería y ciencias de la salud.

El carácter interdisciplinario de las publicaciones de Epistemus en estos campos conduce a nuevas propuestas de investigación y soluciones que se aplican a diversos problemas locales, nacionales e internacionales.

El consejo editorial de Epistemus agradece a todos los Editores Asociados locales, nacionales e internacionales por su apoyo en la publicación de este número 33.

Recientemente la revista ha sido incluida en la hemeroteca virtual Scielo México y esta postulada para formar parte del Sistema de Información Científica Redalyc, así mismo, está a la espera de la convocatoria de Conacyt para ser postulada y formar parte de este catálogo de revistas.

Este número publicó un total de 15 artículos distribuidos en 3 secciones, 2 en Investigación, 3 en desde la academia y 10 en Ciencia, Tecnología y Sociedad, todos ellos con una temática interesante.

En la sección de investigación se habló de un tema común, la movilidad, transporte público y conectividad urbana, temas que requieren las ciudades de manera prioritaria para no generar contaminación, tráfico excesivo y conseguir una buena distribución de la ciudad.

En la sección de Desde la Academia, un autor local, expone los usos y aplicaciones de las redes de Petri, en el sector automotriz, explica ejemplos de estas redes y propone su inclusión dentro de los programas del departamento de ingeniería industrial. Otros autores mencionan a la Astrobiología y comentan a través de la historia como puede ser opción de consolidación de esta como ciencia, basándose en investigaciones de que fortalecen su objetivo. Y un último autor, nos habla sobre nubes proto-estelares conocidas como "the Brick", estas están localizadas cerca del centro de la Vía Láctea. El proceso de formación simulado está basado en la colisión de dos sub-nubes de gas que están contenidas en una nube

progenitora mayor, obteniendo como resultado cúmulos proto-estelares, todo esto realizado en software de simulación.

Por último, la sección de Ciencia, Tecnología y Sociedad presenta diversas temática, se mencionan a las nanotecnologías en la medicina, por ejemplo, combatiendo diferentes bacterias patógenas, el virus SARS-CoV-2 y tratamientos de enfermedades cancerígenas, en la industria, se presentan como alternativa para obtener telas inteligentes, mejorar la estética en carros, la durabilidad de partes y disminución de contaminantes por CO₂. Los catalizadores de 3 vías son una alternativa para reducir la emisión de gases contaminantes, los autores la explican para que sea fácil de comprender y utilizar.

El aprovechamiento de los subproductos que en la mayoría de las ocasiones son desechos del producto principal, aún tienen compuestos potencialmente útiles los cuales pueden ayudar a mejorar los productos cárnicos, esto nos comentan los investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro. Los árboles de decisión para clasificación de vacas lecheras usando información genética es otra investigación que ayuda a los ganaderos a clasificar sus vacas de manera óptima en base a sus marcadores genéticos. La medusa bola de cañón es una medusa que ha sobrevivido 500 millones de años y no se conoce demasiado de ella. Las serpientes de Sonora, presentan un potencial farmacológico grande, se conocen 12 especies altamente venenosas y su veneno, presenta actividades notables en el beneficio de la salud.

La medición de la fluorescencia en la clorofila comenta los autores desde Puebla, que es una forma rápida y no destructiva de entender la sensibilidad de las plantas a diversos factores, con esto se puede analizar la utilidad de los parámetros de fluorescencia como indicadores de los mecanismos de adaptación y las tendencias futuras de su uso. Los suelos agrícolas son muy comunes que se contaminan, para ello, se proponen remedios de descontaminación con plantas y otros métodos, por último, autores de la UniSon, mencionan que los desperdicios de la uva y en base a su capacidad contaminante, proponen aprovechar estos residuos para obtener un beneficio agroindustrial y no desaprovecharlo.

Con todo lo anterior, esperamos que este número cumpla con las expectativas de nuestros lectores, así como los trabajos publicados en los números anteriores.

Atte. Dr. José Luis Ochoa Hernández
Editor Ejecutivo



POLÍTICA EDITORIAL

La educación, la ciencia y tecnología son consideradas como pilares fundamentales sobre los que se sustenta el desarrollo de un país; por eso es importante fortalecer el enlace entre los que generan el conocimiento y los beneficiados de ello: la sociedad. Uno de los aspectos que distingue a la Universidad de Sonora es la generación de conocimiento y su impacto en la sociedad. Es así como las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud crearon el proyecto editorial Epistemus el cual, constituye un medio de información y comunicación para dar a conocer las investigaciones realizadas o en proceso, las actividades académicas, las reflexiones en torno a la ciencia, la tecnología y la salud.

OBJETIVO

Divulgar el conocimiento que se crea, genera y enseña en las áreas de Ingenierías, Ciencias Exactas y Naturales y las Ciencias Biológicas y de la Salud para favorecer el debate académico y la producción de nuevos conocimientos para generar un espacio de difusión, reflexión y crítica, en nuestro entorno.

DIRIGIDA A

Está dirigida a investigadores, profesores y estudiantes de las Ingenierías, las Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y la Salud, y a todos aquellos profesionales que desarrollan la ciencia y la aplican en estas áreas.

SECCIONES DE LA REVISTA

La revista publica artículos originales e inéditos de proyectos de investigación, reseñas, ensayos, y comunicaciones breves sobre ciencia y tecnología y salud, en las siguientes secciones:

Investigación

Incluye resultados de proyectos de investigación y quiere mostrar la metodología del caso.

Divulgación

- **Desde la academia.** Comprende los temas relacionados con el quehacer académico, ensayos, reseñas, desarrollo de problemas, temas de la vida académica y su relación con el entorno.
- **Políticas de Ciencia y Tecnología.** Incluye temas que tienen que ver con el análisis de las políticas en materia de ciencia y tecnología, la relación entre la investigación y el desarrollo, la innovación y las políticas públicas.
- **Ciencia, Tecnología y Sociedad.** Se trata de promover una cultura científica, tecnológica, de la salud y de la sociedad, abordando diversos temas específicos que inviten a la reflexión, y/o al análisis para comprender el conocimiento.

ARBITRAJE

Cada trabajo será revisado por integrantes del Comité Editorial, y una vez que el trabajo sea considerado pertinente, se someterá al proceso de revisión en doble ciego por al menos dos especialistas en el área al que corresponde el artículo. Estos pares académicos deben ser de una institución diferente a la(s) institución(es) de origen del artículo. En caso de que los dictámenes de los especialistas sean contradictorios, el artículo se someterá al Consejo Editorial, o bien se solicitará una evaluación adicional.

- **La decisión podrá ser:** Aceptado, Condicionado o Rechazado.

El dictamen, será comunicado por escrito exclusivamente al autor corresponsal, en un plazo no mayor a tres meses, a partir de la fecha de recepción del original.

EXCLUSIVIDAD

Todos los textos deberán ser originales e inéditos, enviando declaratoria de originalidad (<https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/libraryFiles/downloadPublic/11>) y de no presentarse en paralelo para otras publicaciones. Se deberá asumir la responsabilidad si se detecta falsificación de datos y falta de autenticidad en la publicación.

DERECHOS DE AUTOR

La revista adquiere los derechos patrimoniales de los artículos sólo para difusión sin ningún fin de lucro, sin menoscabo de los propios derechos de autoría.

Los autores son los legítimos titulares de los derechos de propiedad intelectual de sus respectivos artículos, y en tal calidad, al enviar sus textos expresan su deseo de colaborar con la Revista Epistemus, editada semestralmente por la Universidad de Sonora.

Por lo anterior, de manera libre, voluntaria y a título gratuito, una vez aceptado el artículo para su publicación, ceden sus derechos a la Universidad de Sonora para que la Universidad de Sonora edite, publique, distribuya y ponga a disposición a través de intranets, internet o CD dicha obra, sin limitación alguna de forma o tiempo, siempre y cuando sea sin fines de lucro y con la obligación expresa de respetar y mencionar el crédito que corresponde a los autores en cualquier utilización que se haga del mismo.

Queda entendido que esta autorización no es una cesión o transmisión de alguno de sus derechos patrimoniales en favor de la mencionada institución. La Universidad de Sonora le garantiza el derecho de reproducir la contribución por cualquier medio en el cual usted sea el autor, sujeto a que se otorgue el crédito correspondiente a la publicación original de la contribución en Epistemus.

Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica se distribuyen bajo una licencia de uso y

Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>). Puede consultar desde aquí la versión informativa y el texto legal de la licencia. Esta circunstancia ha de hacerse constar expresamente de esta forma cuando sea necesario.

FORMATO GENERAL

- 1. Título:** de la colaboración, máximo de 12 palabras. Escrito en los idiomas Español e Inglés. Debe representar el contenido del artículo y permitir al lector situarse en el contexto específico que aborda.
- 2. Nombre(es) de los autores:** en mayúsculas, separados por una coma, sin grados. Máximo 5 autores.
- 3. Resumen:** Aproximadamente de 100 a 150 palabras, colocado después de los autores del artículo. Debe contener información concisa de principales resultados, métodos y conclusiones.
- 4. Palabras clave:** Mínimo 3 y máximo 5.
- 5. Abstract:** La traducción al inglés del resumen es responsabilidad del autor.
- 6. Keywords:** Mínimo 3 y máximo 5. La traducción al inglés es responsabilidad del autor.
- 7. Afilación de los autores:** ámbito disciplinar, institución académica, dirección de correo electrónico de autor(es).
- 8. Estructura deseable para artículos de investigación** (mínima de 3000 palabras y máxima de 5000 palabras):
 - A. Introducción.
 - B. Objetivo.
 - C. Planteamiento del problema.
 - D. Método de trabajo.
 - E. Resultados.
 - F. Discusión.
 - G. Conclusiones.
- 9. Estructura deseable para artículos de divulgación** (Extensión mínima de 2500 palabras y máxima de 4000 palabras):
 - A. Introducción.
 - B. Desarrollo.
 - C. Conclusiones.
- 10. Citas y referencias:** Preferentemente de los últimos 5 años; deben seguir el formato IEEE (https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_ieee) e ir al final de la colaboración.
- 11. Contenido:** Elaborado en Microsoft Word de Windows. Utilizar letra tipo Arial de 12 puntos, normal, a doble espacio, justificada. Para las expresiones matemáticas debe usarse un editor de ecuaciones y deberán estar numeradas consecutivamente entre paréntesis. No incluir notas en pie de página.
- 12. Tablas, fotos y gráficos:** Se deben incluir en archivos separados. Incluir el título (como nombre Figura1.ext). Fotos y gráficos en formato jpg o tif con una resolución

(en puntos por pulgada) de 300 ppp para imágenes a escala de grises o color, 600 ppp para combinaciones imagen texto o 1,200 ppp para imágenes a línea; las tablas en Excel. Las imágenes deben ser originales o de licencia creative commons (libres de regalías).

- 13. Plantilla:** Bajar la plantilla con el formato general para el documento: Para desarrollar el artículo se encuentra una plantilla establecida de acuerdo a las características de los artículos. En la liga <https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/libraryFiles/downloadPublic/25> se puede encontrar la plantilla en Word para la publicación de los trabajos.

POLÍTICA DE ACCESO ABIERTO

Esta revista proporciona un acceso abierto inmediato a su contenido, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global de conocimiento. Las personas que utilicen la información contenida en la revista para su difusión están obligadas a referenciar la revista como fuente de información.

Esta revista no aplica ningún cargo económico ni en la entrega de artículos ni para la producción editorial de los artículos.

CLÁUSULA DE EXENCIÓN DE RESPONSABILIDAD

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del Comité Editorial de la publicación. Las imágenes son responsabilidad de los autores y o de la imprenta que realiza el diseño. El Comité Editorial declina toda responsabilidad por los derechos que pudieran derivarse de ellas.

FECHAS DE RECEPCIÓN DE ARTÍCULOS

Los artículos se reciben durante todo el año de manera electrónica en la página:

www.epistemus.uson.mx

- Cierre de la edición del primer número del año: Primera quincena de marzo
- Cierre de la edición del segundo número del año: Primera quincena de septiembre
- Diseño final y distribución: Junio y Diciembre de cada año.

MAYORES INFORMES AL CORREO Y PÁGINA WEB

epistemus@unison.mx

www.epistemus.uson.mx

Dra. María Rita Plancarte Martínez

Rector de la Universidad de Sonora

2021 – 2024



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



A lo largo de 79 años, la Universidad de Sonora se ha consolidado como el espacio idóneo para el cultivo del conocimiento científico, social, artístico, desde cualquier vertiente que posea nuestra oferta educativa.

Además, nuestra institución es también el espacio privilegiado donde generaciones de estudiantes han conformado una comunidad universitaria orgullosa de su identidad, de sus valores. Ese mismo orgullo traspasa los muros de la institución y permea en la sociedad.

Desde esta administración institucional, tenemos claro que, cada vez más, debemos insertar el saber que propicia la Universidad, en servicio de los diferentes sectores que requieran apoyo.

Con esa consigna, la Universidad de Sonora continúa su fortalecimiento, mediante un verdadero diálogo con las y los sonorenses que, durante casi ocho décadas, han tenido en la Unison a una aliada, un respaldo firme y generoso para el desarrollo de la región.

En Junio de 2021, la Junta Universitaria lo elige por mayoría de votos como rector de la máxima casa de estudios del estado de Sonora, por el periodo comprendido del 16 de junio de 2021 al 15 de junio de 2024.

Dra. María Rita Plancarte Martínez

Análisis de la demanda de un transporte público en Ciudad de México

Demand for Mexico City's public transportation analysis

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Heber Guillermo González Quiroga ¹

Esther Segura Pérez ²

Wulfrano Gómez Gallardo ³

Recibido: 12 / 09 / 2022

Aceptado: 23 / 11 / 2022

Publicado: 15 / 12 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.248>

Autor de Correspondencia:

Esther Segura Pérez

Correo : esther.segura@anahuac.mx

Resumen

Uno de los servicios más requeridos en la actualidad es el transporte público y se sabe que es el segundo sitio que más miedo produce al usuario después de un cajero automático en la vía pública. Es por ello, que en este estudio se determinan las posibles variables relacionadas con la percepción del usuario en cuanto a la eficiencia en la operación de un sistema de transporte público concesionado que hacen variar el número de viajes en un corredor al sur de la Ciudad de México. Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple y se encontró que algunos días de la semana son altamente significativos, que la demanda es inelástica al precio del servicio, se cuantifica la variación de esta según el día de la semana y cómo es afectada por los temas de inseguridad y accidentes.

Palabras clave: afluencia, percepción de servicio, transporte público, regresión lineal múltiple.

Abstract

One of the most demanded services nowadays is the public transportation, and it is known that it is the second most fearful place for the user after an ATM on the street. Therefore, in this study, possible variables are determined in relation to the user's perception of the efficiency of the operation of a government concessioned public transportation system that vary the number of trips in a south of Mexico City's corridor. Multiple linear regression models were used, and it was found that some days of the week are highly significant, that the demand is inelastic to the price of the service, that the variation of the demand is quantified according to the day of the week and how it is affected by insecurity and accidents issues.

Keywords: traffic, perception of service, public transportation, multiple linear regression.

¹ Ing. Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, hbmadrid@live.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3636-2666>.

² Dra. En Investigación de Operaciones, Facultad de Economía y Negocios, Universidad Anáhuac Norte, Huixquilucan, Estado de México, México, esther.segura@anahuac.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4210-5762>.

³ Dr. En Finanzas, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, wulfrano.gomez@comunidad.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0003-0838-3344>



INTRODUCCIÓN

El servicio de transporte público cuenta con una amplia y compleja red de infraestructura que surge de la creciente necesidad de la población de trasladarse hacia sus destinos ya sea de trabajo, escuela, salud, diversión, entre otros; es decir, propician el desarrollo económico de las regiones. De acuerdo con el Instituto Mexicano para la Competitividad [1] se sabe que más de 2/3 de los 22 millones de viajes diarios en la Ciudad de México se realizan en transporte público con 14.8 millones de usuarios que demandan un servicio de calidad.

La calidad del servicio de transporte se traduce en las necesidades que deben ser satisfechas por este, que en materia de sistemas de calidad se denominan voz del cliente o VOC por sus siglas en inglés (voice of customer). El estudio hecho por Gaskin, Griffin, Hauser, Katz y Klein [2], expresa que la VOC es una técnica de desarrollo de productos que genera un conjunto detallado de deseos y necesidades de los clientes, que se organizan en una estructura jerárquica, y luego se priorizan en términos de importancia relativa y satisfacción con las alternativas actuales. Por otro lado, también se sabe que de acuerdo con el estudio de El Poder del Consumidor [3] los usuarios están insatisfechos con el servicio de transporte público de la ciudad ya que dicho estudio revela que:

El 65% de los usuarios considera que la calidad del servicio es pésima o mala

- Ocho de cada diez usuarios piensan que es inseguro
- Nueve de cada diez coinciden que es incómodo
- Siete de cada diez mencionan que es lento

Se han desarrollado propuestas de mejora en este sentido [4], en el cual, se propone una metodología en la que; por un lado, se aprovecha la experiencia de los dueños en cuanto a la administración de la operación y por otro, las necesidades de los viajeros referente a la calidad de servicio, logrando optimizar la operación del despacho de unidades o la minimización de los tiempos de espera. Esto permite detectar una problemática concreta.



PROBLEMÁTICA

Una de las características más importantes de la prestación de servicios de transporte es que la oferta no se almacena. Esto es, la oferta debe ajustarse de acuerdo con la demanda en tiempo real o con un margen de ajuste relativamente corto, aumentando en las horas pico y disminuyendo en las horas valle, conjugando así un equilibrio entre la calidad y la rentabilidad del servicio. Los estudios que generalmente preponderan en la literatura son los relacionados con el establecimiento del cálculo de la demanda en un sistema de transporte público desde la perspectiva de la Ingeniería de tránsito. Y para ello, existen técnicas muy precisas, pero al mismo tiempo costosas, como lo son las de implementación de un sistema de control de entradas y salidas (por ejemplo, el uso de torniquetes); o bien a través del cálculo de aforos, que consiste en la obtención de una estimación a partir del conteo manual durante un número representativo de días. Sin embargo, de acuerdo con la Ley de Movilidad del Distrito Federal [5], los sistemas de transporte deben realizar periódicamente estudios que permitan conocer las necesidades de movilidad de sus usuarios y mejorar el servicio de acuerdo con estas, ajustando la oferta a la demanda, en el momento en que debe prestarse, además de la identificación de las variables que hacen del servicio uno bueno, pero nunca se especifican los factores o variables que logran un mejor servicio, como lo propuesto por [4] previamente señalado. En este estudio se determinan algunas de estas variables empleando la información de un sistema público concesionado de la Ciudad de México quien solicitó ayuda para efectuar un análisis que permita determinar las variables que pudieran afectar la afluencia de la demanda y en particular su disminución. El objetivo de la investigación es identificar las variables que alteran el comportamiento de la demanda en el sistema de transporte analizado y así tener herramientas para planear estrategias que mejoraran su funcionamiento, apoyándonos de la técnica VOC, que de acuerdo con [6] no existe una herramienta superior que permita la mejora de la calidad de un servicio ya sea público o privado en el que el transporte público no sea la excepción.

METODOLOGÍA

1. Se consultaron las fuentes [3] y [7] para la identificación de las variables que afectan la afluencia, con un enfoque VOC y se concluye que los factores determinantes para identificar una buena o mala calidad del servicio son: inseguridad e incomodidad y lentitud del servicio. Sin embargo, es necesario determinar otras variables que inciden en la variabilidad de la demanda del servicio, específicamente de la empresa analizada.
2. También, se identificaron y analizaron los modelos econométricos que permitieran la agregación de todas las variables de las que se tiene información utilizando la teoría de modelos econométricos explicados en la fuente [8] y [9] y para la prueba de Granger, se utilizó como referencia el libro de causalidad en economía [10].



3. Captura de información. Para el análisis de la demanda, la empresa en cuestión disponía de los siguientes datos, con intervalos de tiempo diario, con una ventana de tiempo que inicia en enero de 2015 y termina en febrero de 2019:

- demanda diaria del servicio
- robos
- accidentes
- variación del costo del servicio
- número de camiones diarios utilizados en el servicio
- Se investigaron los datos de afluencia de la competencia directa.
- Días de la semana se consideraron como variables explicativas dispuestas como variables ficticias.

4. Se observaron cambios estructurales en la demanda durante los años 2015 y 2016, incluyendo casi la mitad del año 2017; se optó por recortar las series de demanda durante esos años y tomar sus valores diarios desde el 1 de enero de 2017 hasta el 27 de febrero de 2019 previos a la pandemia ocasionada por el Covid-19, con un total de 788 datos con frecuencia diaria. La figura 1 muestra los datos de la demanda diaria. La ventana de tiempo también fue ajustada para el resto de las series de datos de las variables empleadas.

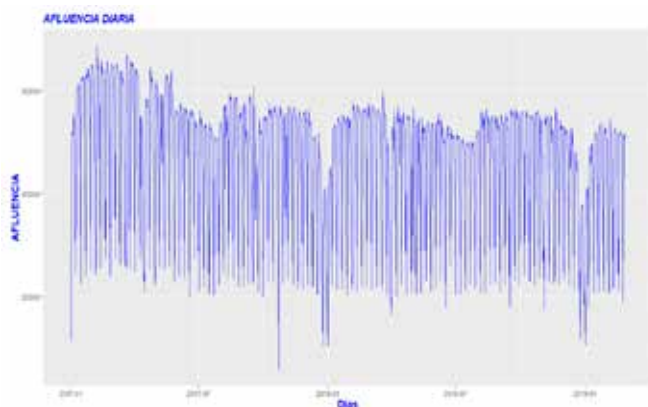


Figura 1. Datos de demanda de la empresa de transporte público estudiada

Previo a la construcción del modelo es relevante la revisión del comportamiento de la variable de interés (afluencia diaria). En la figura 2, se puede observar que la serie presenta una tendencia negativa y un marcado comportamiento estacional; por lo que se necesita filtrar la serie para conocer de forma cuantitativa el valor correspondiente a la tendencia, así como los valores de sus factores estacionales. Por otra parte, es importante hacer notar los picos que apuntan hacia abajo, por lo que se analiza su comportamiento y posible causa.

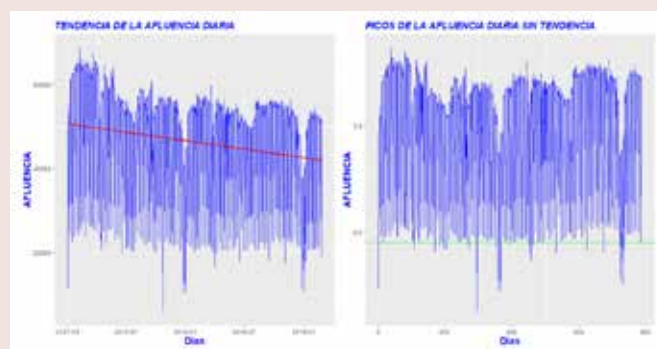


Figura 2. Tendencia y picos de la afluencia diaria.

En la tabla 1 y figura 3, se muestran los resultados obtenidos del cálculo de los factores estacionales tanto para los meses del año como los días de la semana.

Tabla 1. Valores de los Factores Estacionales por día y mes.

Día	FE	Mes	FE	Mes	FE
Lunes	1.10	Ene	0.99	Jul	0.95
Martes	1.17	Feb	1.05	Ago	1.05
Miércoles	1.17	Mar	1.03	Sep	0.99
Jueves	1.16	Abr	0.98	Oct	1.04
Viernes	1.13	May	1.01	Nov	1.01
Sábado	0.79	Jun	1.01	Dic	0.87
Domingo	0.48				



En la tabla 1, se puede apreciar, por ejemplo, que la demanda se incrementa en un 5.71% cuando pasa de lunes a martes, en un 0.48% del martes al miércoles; mientras que del miércoles al jueves se decrementa en un 1.76%; y del jueves a viernes en un 2.63%; del viernes al sábado se presenta la caída más importante de la demanda en un 34.42%, y de igual manera, del sábado al domingo con un valor del 30.88%. Finalmente, el incremento de la demanda más grande se da del domingo al lunes con un 63.50%. Este comportamiento se repite cada semana, el cual se puede apreciar en la figura 3.

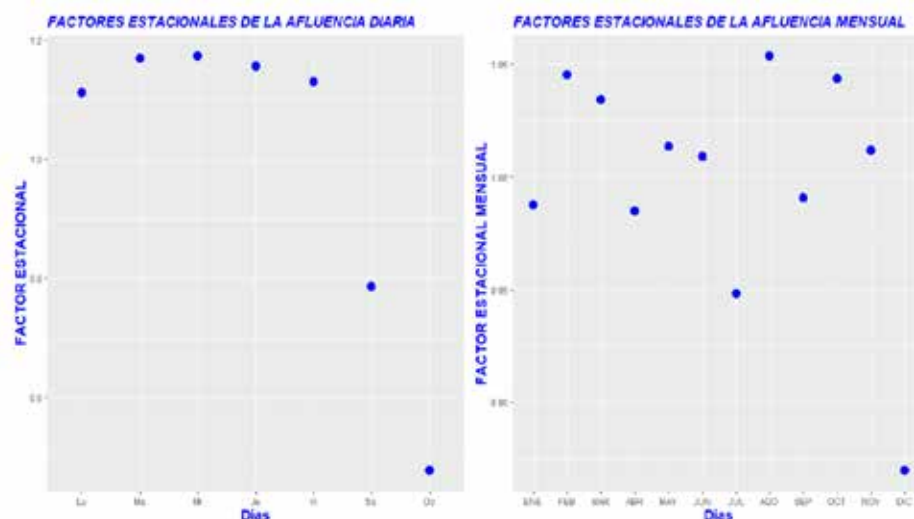


Figura 3. Comportamiento de los Factores Estacionales por día de la semana y mes del año.

El cálculo de los factores estacionales también puede ser realizado para otros periodos, en este caso por mes para tener una idea del comportamiento de la serie a lo largo del año. La tabla 1 muestra los factores estacionales por mes y se puede observar que existen incrementos de la afluencia de enero a febrero del 5.75%; de abril a mayo del 2.87%; entre julio y agosto del 10.53%; septiembre a octubre del 5.31%; de diciembre a enero del 11.79% que resulta ser el incremento más grande entre los meses. Por otro lado, se presentan decrementos entre febrero marzo del 1.10%; de marzo a abril del 4.93%; de mayo a junio del 0.43%; de junio a julio del 6.08%; de agosto a septiembre del 6.31%; de octubre a noviembre del 3.20% y finalmente el decremento más grande se presentade noviembre a diciembre con un valor del 14.20%. Así mismo, de la figura 3 se puede apreciar que los meses de enero y septiembre comparten un comportamiento estacional similar, lo mismo ocurre con febrero y agosto. Finalmente, mayo, junio y noviembre tienden a tener el mismo valor de factor estacional.

En lo que respecta a los picos negativos estos se presentan en los días feriados y tienen impactos significativos en la demanda, no importando si son días laborales, entre semana de lunes a viernes, o fines de semana sábados y domingos. Para la muestra de los años 2017, 2018 y parte del 2019.

Una vez realizado este análisis y teniendo un mejor entendimiento del comportamiento de la serie en estudio se procede a la construcción del modelo.

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Con estas variables se construye el siguiente modelo de regresión lineal dada por la ecuación (1), sabiendo que a través de estas variables llamadas explicativas (x_i) que, al calcularlas, se determina el valor de la variable explicada (y), que en este caso es la afluencia del servicio llamada demanda.

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{demanda}} = & \beta_0 + \beta_1 x_N + \beta_2 x_{\text{camiones}} + \beta_3 x_{\text{asaltos}} + \beta_4 x_{\text{accidentes}} + \beta_5 x_{\text{tasa}} + \beta_6 x_{\text{competencia}} \\
 & + \beta_7 x_{\text{domingo}} + \beta_8 x_{\text{lunes}} + \beta_9 x_{\text{martes}} + \beta_{10} x_{\text{miércoles}} + \beta_{11} x_{\text{jueves}} + \beta_{12} x_{\text{viernes}} \\
 & + \beta_{13} x_{\text{sábado}} + \varepsilon
 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

Y_{demanda} : número de usuarios registrados con frecuencia diaria.

x_N : periodo secuencial con frecuencia diaria

x_{camiones} : número de camiones registrados

x_{asaltos} : número de asaltos registrados

$x_{\text{accidentes}}$: número de accidentes registrados

x_{tasa} : precio del servicio

$x_{\text{competencia}}$: número de usuarios registrados por competencia directa

x_{domingo} : valor de 1 si el día es domingo

x_{lunes} : valor de 1 si el día es lunes

x_{martes} : valor de 1 si el día es martes

$x_{\text{miércoles}}$: valor de 1 si el día es miércoles

x_{jueves} : valor de 1 si el día es jueves

x_{viernes} : valor de 1 si el día es viernes

$x_{\text{sábado}}$: valor de 1 si el día es sábado

β_0 : es el valor del intercepto

$\beta_1, 2, \dots, 13$: es el parámetro asociado a la correspondiente.

ε : Es el término de error.

Es necesario aclarar que las variables que se incorporaron para cuantificar el impacto de la estacionalidad presente en la serie en estudio fue el de los días de la semana, esto debido a que las decisiones que se toman son en un plazo muy corto. Así mismo si se hubieran agregado los meses del año para explicar el comportamiento del modelo esto hubiera generado una probabilidad mayor de caer en un problema de colinealidad. Finalmente, si se hubiera ingre-

sado como variables explicativas a los meses del año junto con los días de la semana, el coeficiente independiente, en este caso la beta cero estimada, no se puede interpretar fácilmente. Una vez propuestas las variables es necesario determinar si estas explican la afluencia.

Solución del modelo propuesto: Determinación de contribución de cada variable a la demanda.

Se procede a resolver el modelo de regresión lineal múltiple expresado por las ecuaciones (2) y (3) de la siguiente manera:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para este modelo, se considera que los valores de Y_{demanda} son el resultado de las combinaciones lineales de las variables explicativas x_i y un término aleatorio. Primero se acomodan los valores de Y_t expresados en la ecuación (4)

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\text{demanda}_1} \\ Y_{\text{demanda}_2} \\ \vdots \\ Y_{\text{demanda}_{788}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11503 \\ 46111 \\ \vdots \\ 51216 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Los valores de X están ordenados en una matriz ampliada, en la que la primera columna está definida sólo por números uno, ecuación (5):





$$\begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} = \dots \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & x_{N_1} & x_{camiones_1} & x_{asaltos_1} & x_{accidentes_1} & x_{tasae_1} & x_{competencia_1} & x_{domingo_1} & x_{lunes_1} & x_{martes_1} & x_{miercoles_1} & x_{jueves_1} & x_{viernes_1} \\ 1 & x_{N_2} & x_{camiones_2} & x_{asaltos_2} & x_{accidentes_2} & x_{tasae_2} & x_{competencia_2} & x_{domingo_2} & x_{lunes_2} & x_{martes_2} & x_{miercoles_2} & x_{jueves_2} & x_{viernes_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{N_{788}} & x_{camiones_{788}} & x_{asaltos_{788}} & x_{accidentes_{788}} & x_{tasae_{788}} & x_{competencia_{788}} & x_{domingo_{788}} & x_{lunes_{788}} & x_{martes_{788}} & x_{miercoles_{788}} & x_{jueves_{788}} & x_{viernes_{788}} \end{bmatrix}$$

Se elimina la columna x_{sabado} para evitar la dependencia lineal y problemas de colinealidad entre las variables explicativas. El valor de esta variable se expresará mediante β_0 estimada.

La tabla 2 presenta los resultados de la regresión considerando un nivel significancia del 5% utilizando el análisis de datos de excel [11].

Tabla 2. Regresión estadística

Coefficiente de correlación múltiple	0.903174073
Coefficiente de determinación R^2	0.815723406
R^2 ajustado	0.812870091
Error típico	5852.756498
Observaciones	788

Elaboración propia

El coeficiente de determinación ajustado nos indica que el 81.29% de la variación en la variable de respuesta se debe a un incremento de las variables explicativas, el resto se puede asumir al término de error. El resultado de los parámetros β estimados se muestran en la siguiente ecuación 6, así como los valores p:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{demanda_i} = & 30,798.07067 - 6.163428975x_N + 295.5046268x_{camiones} \\ & (1.55052923E-13) \quad (0.00070284131) \quad (7.6426660E-20) \\ & - 3,772.860379x_{asaltos} + 338.9645388x_{accidentes} \\ & (0.208511638794) \quad (0.116735433375) \\ & - 2,887.376865x_{tasa} + 0.295400417x_{competencia} \\ & (5.90417718E-08) \quad (2.6673272E-15) \\ & - 7,152.869605x_{domingos} + 24,727.97743x_{lunes} \\ & (4.89105819E-13) \quad (5.18498704E-49) \\ & + 16,554.66143x_{martes} + 15,731.84525x_{miercoles} \\ & (2.37544339E-53) \quad (1.2148718E-50) \\ & + 14,560.11607x_{jueves} + 13,776.0548x_{viernes} \\ & (2.0175384E-44) \quad (3.657160E-45) \end{aligned} \quad (6)$$

Realizando el análisis de los coeficientes β estimados y sus respectivos valores p obtenidos de la regresión lineal, tenemos las siguientes afirmaciones:

- A pesar de que el signo del coeficiente de la variable "asaltos" es consistente con el modelo, dicho valor no es estadísticamente significativo.
- En el caso de "accidentes", el signo de su coeficiente estimado no es consistente, pero al igual que el caso de la variable "asaltos" no es estadísticamente significativo.
- El resto de los coeficientes resultaron ser estadísticamente significativos.

Análisis preliminar: determinar análisis de coeficientes inesperados.

Del análisis de los coeficientes previo a la prueba de significancia, se desprenden dos coeficientes con valores inesperados. El primero es el coeficiente β_4 estimado, relacionado con los "accidentes", el signo esperado era negativo (-); ya que, como se ha explicado anteriormente, un accidente es contraproducente para un aumento de la afluencia. Sin embargo, el resultado que se obtuvo fue: "La afluencia aumenta en promedio 338.9645388 usuarios por un incremento de un accidente, manteniendo las demás variables constantes". Esto indicaría que la empresa, si quiere aumentar la demanda de su servicio, debe aumentar los accidentes, un análisis totalmente inesperado.

El segundo valor inesperado es el del coeficiente β_6 estimado, relacionado con la variación de la afluencia de la competencia ya que se espera que tenga un efecto inverso a la variación de la afluencia local; es decir, si la afluencia de la competencia aumenta, la afluencia local disminuye teniendo un signo negativo (-); sin embargo, el coeficiente obtenido de la regresión tuvo un signo positivo (+) dando como resultado: "La afluencia aumenta en promedio 0.295400417 usuarios por cada aumento de un usuario que utiliza el servicio ofrecido por la competencia, esto manteniendo las demás variables constantes". Esto indicaría que la empresa, si quiere aumentar la demanda de su servicio, debe incentivar a su competencia directa para que aumente la demanda de su servicio, situación que vuelve a caer en lo inesperado.

Por lo tanto, se necesita una prueba estadística para explicar este comportamiento y para tal efecto se utiliza la prueba de causalidad de Granger para ambas variables. Hasta ahora, hemos conseguido que la afluencia y sea una función de $x_{Accidentes}$ y $x_{Competencia}$ de la siguiente manera, expresado por la ecuación (7):

$$y = f(x_{accidentes}, x_{competencia}) \quad (7)$$

Es decir, la flecha de causalidad indica que $x_{accidentes}$ causa la afluencia y ($x_{accidentes} \rightarrow y$) y $x_{competencia}$ causa la afluencia y ($x_{competencia} \rightarrow y$); sin embargo, como mencionan Gujarati y Porter [10] es necesario considerar que la flecha de causalidad puede cambiar de dirección, siendo y causante de $x_{accidentes}$ ($y \rightarrow x_{accidentes}$) y y causante de $x_{competencia}$ ($y \rightarrow x_{competencia}$) expresada como: $x_{accidentes}, x_{competencia} = f(y)$.

El resultado de la prueba de Granger efectuado en el software Eviews [12] para estas dos variables dicta el juicio de los resultados, indicando que tanto los accidentes como la competencia no pueden ser causados por la afluencia. Esto es un problema, ya que ambas variables seguirán sin tener una explicación estadística verificable, sin embargo, se pueden hacer suposiciones y a través de la recolección continua de datos se pueden verificar estas suposiciones.

Al reconstruir el modelo de regresión lineal múltiple considerando sólo las variables estadísticamente significativas, el modelo se muestra en la ecuación (9):



$$y_{demanda} = \beta_0 + \beta_7 x_{martes} + \beta_8 x_{miércoles} + \beta_9 x_{jueves} + \beta_{10} x_{viernes} + \beta_1 x_N + \beta_2 x_{camiones} + \beta_3 x_{tasa} + \beta_4 x_{competencia} + \beta_5 x_{domingo} + \beta_6 x_{lunes} + \varepsilon \quad (9)$$

Se eliminan las variables x_{saltos} y $x_{accidentes}$ por no ser estadísticamente significativas y se reasignan los coeficientes β estimados. Con el modelo de regresión lineal múltiple actualizado (ecuación 10), el cálculo de los coeficientes β estimados se realiza de nuevo mediante el análisis de datos de excel [9].

$$\begin{aligned} \hat{y}_{demanda_i} = & 29,276,77898 - 7,912361928x_N + 300,775675x_{camiones} \\ & - 2,597,144171x_{tasa} + 0,293393031x_{competencia} \\ & - 7,530,334738x_{domingos} + 25,995,30997x_{lunes} \\ & + 17,841,45097x_{martes} + 16,934,75353x_{miercoles} \\ & + 15,777,95593x_{jueves} + 14,750,46379x_{viernes} \end{aligned} \quad (10)$$

RESULTADOS

Los resultados son los siguientes (se redondean los valores de los coeficientes al tratarse de usuarios):

- "La afluencia es aproximadamente de 29,277 usuarios si el día es sábado".
- "Existe una disminución en la afluencia a razón de 8 usuarios por cada día, lo que muestra una tendencia negativa; es decir, los usuarios han disminuido a través del tiempo".
- "También se encontró que por cada unidad en el servicio se aumenta la afluencia a razón de 301 usuarios".
- "El número de viajes se ve disminuido a razón de -2,597 usuarios por cada incremento en un peso MXN en el costo del servicio, lo que denota que la demanda es inelástica al precio del servicio".
- "Por cada persona que utiliza el transporte ofrecido por la competencia el aforo aumenta en promedio 0.3 usuarios".
- "Si el día es domingo, comparado con el sábado, el flujo de personas se ve disminuido a razón de 7,530 pasajeros".

- "Si los días son lunes, martes, miércoles, jueves y viernes el flujo de personas aumenta aproximadamente 25,995, 17,841, 16,935, 15,778 y 14,750 usuarios respectivamente si se compara con el sábado".

Otros valores que arroja la regresión son los estadísticos de regresión mostrados en la tabla 3:

Tabla 3. Regresión estadística actualizada	
Coeficiente de correlación múltiple	0.902579362
Coeficiente de determinación	0.814649504
ajustado	0.812264041
Error típico	5862.226375
Observaciones	788

Fuente: Elaboración propia

Para este trabajo se considera el valor del Coeficiente de determinación ajustado R^2 , el cual indica, qué tan bueno es el modelo construido. A diferencia del Coeficiente de Determinación no ajustado, el R^2 ajustado es fiable ya que muestra la variación del $Y_{demanda}$ por las variables explicativas y penaliza por cada variable agregada. El valor ajustado de R^2 fue de 81.23%, lo que indica que de las variables explicativas propuestas pueden explicar la variación de $Y_{demanda}$. Sólo el 18.77% de la de la variación en la demanda es explicada por el término de error. Por lo tanto, se concluye que las variables explicativas del modelo reflejan el comportamiento de la demanda o afluencia en ese corredor con esa ruta.

El valor del 81.22% considera únicamente las variables X_N , $X_{camiones}$, X_{tasa} , $X_{competencia}$, $X_{domingo}$, X_{lunes} , X_{martes} , $X_{miércoles}$, X_{jueves} , y $X_{viernes}$, a pesar de que penaliza por cada variable ingresada, el valor es bastante aceptable. Si se hubiera considerado también $X_{accidentes}$ y $X_{asaltos}$, el R^2 ajustado aumenta muy poco, llegando a un 81.28% de incremento, lo que nos parece importante teniendo en cuenta que ambas variables no son significativas.

DISCUSIÓN

A partir de estos resultados, la empresa concesionaria debe atender y potenciar las variables de impacto positivo y generar políticas internas que mitiguen el impacto de las variables negativas. Ahora podemos saber qué variables son las determinantes de la fluctuación de la demanda y el responsable de la planificación estratégica de la empresa tiene la posibilidad de tomar decisiones concretas para mejorar el servicio y aumentar la demanda de este.

Se logra observar con claridad que conforme pasan los días de la semana la afluencia disminuye y entonces se pueden diseñar modelos que optimicen la flota de autobuses con base este conocimiento. También, se puede señalar que no existe suficiente evidencia que indique que los accidentes y asaltos no contribuyen a la variación de la afluencia de la demanda en esa ruta de la compañía conce-

sionaria estudiada. Esto es, no se ha llegado a alcanzar un umbral en el que el número de accidentes y asaltos sean lo suficientemente grandes como para afectar la decisión de los usuarios en cambiar su modo de transporte.

También, resulta de interés que la afluencia de la competencia influye de manera positiva en la afluencia de la compañía estudiada. Esto podría ser explicado de la siguiente manera: el incremento en la competencia se puede deber a que consideran que hay un mercado insatisfecho que pueden tomar; sin embargo, en vez de reducir la demanda de la ruta estudiada, el hecho de que se presente la competencia indica al usuario que hay más opciones y esto tiene un efecto positivo ya que más usuarios optarán en escoger esa ruta.

A pesar de que el porcentaje de variación entre días de la semana empleando Factores Estacionales y el Modelo Lineal muestran diferencias, estas pueden adjudicarse al término de error y se puede considerar que no son tan grandes. Sin embargo, es de resaltar que el porcentaje de variación con una mayor diferencia es el que corresponde a la comparación del martes respecto al lunes como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de incremento/decrementos de afluencia entre días de la semana empleando los Factores Estacionales de la serie y el Modelo de Regresión calculado. Fuente: elaboración propia.

Días comparados	Con Factores Estacionales	Con Modelo Lineal
Lunes-martes	5.71%	-14.75%
Martes-miércoles	0.48%	-1.42%
Miércoles-jueves	-1.76%	-2.50%
Jueves-viernes	2.36%	-2.28%
Viernes-sábado	-34.42%	-33.50%
Sábado-domingo	-30.88%	-25.72%
Domingo-lunes	63.50%	54.16%

CONCLUSIONES

A través de este análisis se logra un modelo de regresión lineal múltiple que permite establecer las variables que explican el movimiento de la afluencia en un transporte público concesionado en la Ciudad de México desde la perspectiva de la voz del cliente que a diferencia de algunas de las metodologías de ingeniería de tránsito no la consideran. Consideramos que cada metodología tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, se considera que son complementarias, ya que por un lado se pueden medir los niveles de afluencia de manera precisa en ambas metodologías, pero no se sabe desde la percepción del usuario qué causa las variaciones en el número de viajes. Se observa por ejemplo que la competencia puede ser un factor positivo de aumento de estos, o bien, que los asaltos no son



determinantes (al menos con los datos analizados) para que exista una disminución y que son conclusiones que no se tendrían con las metodologías de ingeniería de tránsito. Este análisis puede emplearse para hacer la planeación de la ruta considerada, sin embargo, esto debe ser comprobado con los datos post pandemia que se están generando. Además, conocer el porcentaje de variación entre días permitirá tener una decisión más precisa para estimar la demanda y por ende el número de unidades necesarias para atender a la misma.

INVESTIGACIÓN FUTURA

Se requiere de un análisis estadístico más profundo de la demanda cuando se presentan días feriados como un comportamiento que puede ser tipificado y estimar la caída en la afluencia esperada, lo que puede dar mayores herramientas en la toma de decisiones para estos días en particular, tenido en cuenta cuando estos caen entre semana o los fines de semana.

Se puede robustecer el estudio al incorporar intervalos de confianza en el análisis de los factores estacionales y los correspondientes al modelo de regresión, establecer su relevancia estadística en el estudio y explicar la diferencia tan grande en el porcentaje de variación entre los lunes y martes.

El estudio fue realizado previo al inicio de la pandemia que detono en China en diciembre del 2019, se puede suponer que actualmente en México se están retomando las actividades presenciales con todas las modificaciones que esto involucra y que el estudio realizado puede emplearse para hacer la planeación de la ruta. Sin embargo, esto debe ser comprobado con los datos post pandemia que se están generando.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Gabriel y A. Gabriela, "Movilidad competitiva en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: diagnóstico y soluciones factibles", Instituto Mexicano para la Competitividad, Resumen ejecutivo, Ciudad de México, México, enero, 2012.
- [2] S. P. Gaskin, A. Griffin, J. R. Hauser, G.M. Katz and R.L. Klein, "Voice of the Customer", in Wiley International Encyclopedia

of Marketing. Wiley & Sons, Limited, John, 2010. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/9781444316568.wiem05020>

- [3] A. G. Arnulfo, "Calidad del transporte público en la Ciudad de México", El Poder del Consumidor, Sondeo de opinión de usuarios del transporte público (UAM-I/GDF, 2000), Ciudad de México, México, 2011. [En línea]. Disponible: https://elpoderdelconsumidor.org/wp-content/uploads/1104-Calidad-transporte-público_df.pdf
- [4] A. Stelzer, F. Englert, S. Hörold y C. Mayas, "Improving service quality in public transportation systems using automated customer feedback", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 89, pp. 259–271, mayo de 2016. Accedido el 25 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.05.010>
- [5] México, Departamento del Distrito Federal, "Ley de Movilidad del Distrito Federal", Diario Oficial de la Federación, 7 de diciembre de 2014. Accedido el 17 de febrero de 2019.
- [6] P. Jach, J. Antony, S. P. Thomson, B. Cudney y S. Furterer, "Voice of the customer as a tool for service quality analysis in public transport", The TQM Journal, ahead-of-print, ahead-of-print, julio de 2021. Accedido el 25 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1108/tqm-05-2021-0134>
- [7] Ó. Sánchez-Flores y J. Romero-Torres, "Factores de calidad del servicio en el transporte público de pasajeros: estudio de caso de la ciudad de Toluca, México", Economía Sociedad y Territorio, enero de 2010. Accedido el 19 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.22136/est002010152>
- [8] J. Wooldridge, Introductory Econometrics: A Modern Approach, 2a ed. South-Western College Pub, 2002.
- [9] W. H. Williams, W. and D. C. Montgomery, "Probabilidad y estadística para la ingeniería y la administración, Michigan State University, Ed. CENGAGE Learning, 2009.
- [10] D. N. Gujarati, and D. C. Porter, "Causality in economics: The Granger causality test." Basic Econometrics (Fifth international ed.). New York: McGraw-Hill 652 2009.
- [11] <https://excelparatodos.com/que-es-excel/>
- [12] <https://www.eviews.com>

Cómo citar este artículo:

Gonzalez Quiroga, H. G., Segura Pérez, E., & Gomez Gallardo, W. (2022). Análisis de la demanda de un transporte público en Ciudad de México. EPISTEMUS. 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.248>

Análisis de la conectividad urbana de la ciudad de Hermosillo, Sonora

Urban connectivity analysis in the city of Hermosillo, Sonora

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

G. Ramírez-Urbe ¹

J. F. García Arvizú ²

A. Ojeda De La Cruz ³

J. Quintana Pacheco ⁴

I. Miranda Pasos ⁵

Recibido: 30 / 08 / 2022

Aceptado: 03 / 01 / 2023

Publicado: 26 / 01 / 2023

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.247>

Autor de Correspondencia:

Gerardo Ramírez Uribe

Correo: gerardo.ramirez@unison.mx

Resumen

El presente estudio es de tipo no experimental, transversal y descriptivo y tiene como objetivo explicar la relación existente entre la morfología urbana de la ciudad y los ejes viales que la componen, mediante un análisis de sintaxis espacial implementando la herramienta Depthmax. Entre los primeros resultados se destaca que los ejes viales con mayor conectividad se encuentran ubicados en el norte, centro y suroeste de la ciudad; los ejes viales con mayor integración y profundidad se localizan al norte; y los de mayor elección en el centro. Para finalizar, se concluye que mediante la sintaxis espacial es factible analizar las posibles aperturas de zonas verdes; que, gracias a la configuración espacial, la primordial pauta de movilidad de los sujetos, permite realizar modificaciones de peatonización en ámbitos de interés.

Palabras clave: sintaxis espacial, morfología urbana, red urbana.

Abstract

The present study is of a non-experimental, cross-sectional and descriptive type and aims to explain the relationship between the urban morphology of the city and the road axes that compose it, through a spatial syntax analysis implementing the Depthmax tool. Among the first results, it stands out that the road axes with the greatest connectivity are located in the north, center and southwest of the city; the road axes with greater integration and depth are located to the north; and those of greater choice in the center. Finally, it is concluded that through the spatial syntax it is feasible to analyze the possible openings of green areas; which, thanks to the spatial configuration, the main pattern of mobility of the subjects, allows modifications of pedestrianization in areas of interest.

Keywords: spatial syntax, urban morphology, urban network. Incl.

¹ PhD, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, gerardo.ramirez@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0001-7036-764X>

² MA, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, fernando.garcia@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0001-6543-7017>

³ PhD, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, arturo.ojeda@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4513-514X>

⁴ PhD, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, jesus.quintana@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1797-6213>

⁵ PhD, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, israel.miranda@unison.mx, <https://orcid.org/0000-0002-0525-9789>

INTRODUCCIÓN

El presente estudio está basado en el desarrollado por Hillier, el cual, en la década de 1970 inició investigaciones sobre la sintaxis espacial, la cual consiste en un enfoque basado en la ciencia. La investigación que utiliza el enfoque de sintaxis espacial ha demostrado que: patrones de movimiento están poderosamente influidos por disposición espacial y patrones de seguridad e inseguridad se ven afectados por el diseño espacial; esta relación da forma a la evolución de los centros y subcentros que hace agradable la ciudad. La sintaxis espacial busca establecer relaciones entre esta composición espacial y características urbanas como el movimiento de personas y vehículos, el valor de la tierra, y la ubicación del comercio (Martínez, 2017). Existen herramientas para el análisis de la sintaxis espacial, entre las que sobresale Depthmapx, esta es una aplicación de software multi-plataforma que realiza un análisis de la red espacial diseñada para entender los procesos sociales en el entorno construido. 'DepthmapX' se basa en el original Depthmap que fue desarrollado por Tasos Varoudis del grupo espacial de la University College London (UCL) (Depthmapx, 2015).

Empíricamente, esta dicotomía entre barreras y permeabilidades se compone tanto de obstáculos al movimiento peatonal (edificios, jardines, piscinas, diferencias de nivel, etc.) como a un sistema de espacio abierto a través del cual se puede realizar dicho movimiento. El sistema de espacios abiertos se puede descomponer analíticamente en espacios convexos y espacios axiales (Holanda, 2002), que afectan la forma en que las personas perciben espacialmente el mundo circundante, un factor que se considera esencial para los movimientos.

El desarrollo espacial de las áreas urbanas afecta las características del paisaje, así como la percepción estética de las personas. Específicamente, el sprawl da como

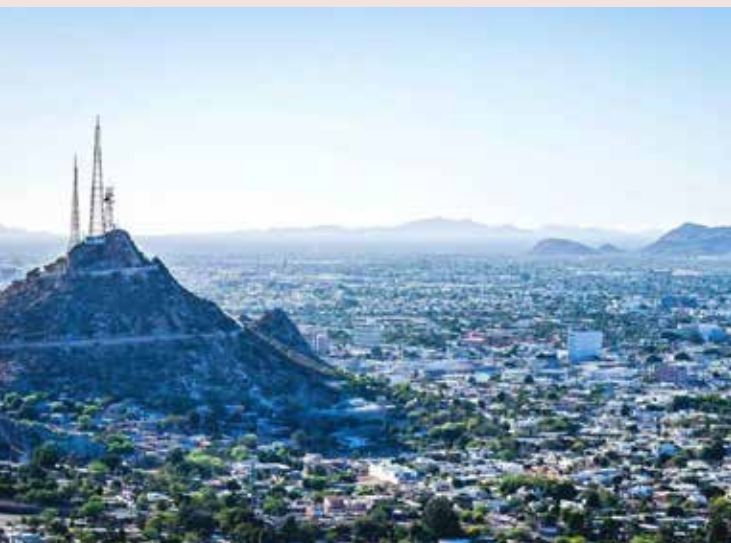
resultado una morfología urbana que es diametralmente opuesta al modelo de ciudad compacta y que asume varios tipos de patrones (Ronchi, 2018).

Planteamiento del problema

Hermosillo es una ciudad en constante crecimiento y los habitantes están acostumbrados a sus nuevas características y aceptar los problemas de su modernismo, se observa la vieja ciudad con las imágenes de lo nuevo, de lo contrastante. La ciudad crece hacia la periferia mientras en el centro se quedan los conflictos; tales como, el estacionamiento en los alrededores del Mercado Municipal, el debate, los comerciantes ocupan los lugares de estacionamiento mientras los clientes. La historia de Hermosillo en la segunda mitad del siglo pasado, son muchas historias dispersas por la ciudad. Posteriormente, el esquema del urbanismo cerrado interpretado como una propuesta de la posmodernidad basadas sus comunicaciones, la producción industrial de la modernidad. La desaparición del barrio es la desaparición del reducto, la aparición del fraccionamiento, la del sistema. Los capitales especulativos sustituyen a los capitales industrial y financiero. Asuntos de la economía que podríamos relacionar con un nuevo modelo en la arquitectura. El funcionalismo, la economía en todos los movimientos de la producción y de la distribución, se recrea en el diseño de edificios pensados para organizar y producir y, en un momento secundario, especular con ellos (Uribe, 2018).

En Sonora, el 80% de la población se encuentra viviendo en las 10 ciudades más grandes del estado, las tres con mayor población son Hermosillo con 29.1%, seguido por ciudad obregón con el 11.2% y Nogales con 8.9%; para el caso de Hermosillo, estos datos representan un crecimiento notable a comparación de la población





que residía en estas ciudades en los años setenta. La tasa de crecimiento poblacional a nivel nacional se encuentra en el 1.4%, mientras que a nivel estatal está en 1.6%, la tasa en la ciudad de Hermosillo se encuentra en el 2.8% de crecimiento anual, estos resultados reflejan que en Hermosillo se tiene una tasa de crecimiento dos veces mayor a la tasa nacional (INEGI, 2020).

OBJETIVO DEL ESTUDIO

Con base en el contexto y problemáticas anteriormente descritos se determina que el objetivo del presente artículo es explicar la relación existente entre la morfología urbana de la ciudad y los ejes viales que la componen, mediante la sintaxis espacial.

Mapas axiales

Los mapas axiales se presentan universalmente a través de escalas, características transculturales en la distribución de longitudes de línea, y "en cualquier mapa axial, hay un gran número de líneas cortas y un pequeño número de líneas muy largas" (Hillier, 2002); estos últimos constituyen un fondo que identifica los intercambios a pequeña escala; el primero, las líneas estructurantes.

También, aparece cierta incertidumbre en el proceso de producción del mapa axial a partir de una pieza de textura urbana real.

En el aspecto metodológico, ha habido un notable florecimiento de nuevos métodos sintácticos de muchas fuentes y lugares. Según estudios realizados por la University College London (UCL), el estudio más significativo de ellos, ha sido (mencionar el estudio), el cual tiene como objetivo investigar los efectos que tiene el diseño de plantas en los paisajes de los hospitales de Kerman con la orientación de los usuarios utilizando técnicas de sintaxis espacial. Al hacerlo, se utilizan la investigación bibliotecaria, la simulación por computadora y el análisis con el software Depthmap del University College London (UCL); así como técnicas de comparación (Geng, 2021).

METODOLOGIA

A continuación, se presenta el apartado metodológico, en el cual se describe el sujeto y tipo de estudio de la presente investigación, así como las bases conceptuales e instrumento utilizado para el análisis de la sintaxis espacial.

Descripción del sujeto de estudio

Hermosillo ha concentrado la mayor velocidad en el crecimiento poblacional registrado en el estado, lo cual tiene implicaciones sobre el aumento de requerimiento de vivienda y de servicios públicos como drenaje, alcantarillado y alumbrado público, factores que a la vez aceleran el crecimiento de la mancha urbana (Lagarda et al, 2009).

En la Figura 1, se muestra la localización geográfica de los ámbitos de estudio en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Figura 1. Localización de Hermosillo, Sonora, México.



Fuente: Elaboración propia.

Para su fácil análisis, el Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN, 2018), ha delimitado áreas de estudio, las cuales han sido clasificadas por su ubicación geográfica, estas se muestran en la Figura 2. Posteriormente, dentro de las conclusiones de este documento se hará uso de estas delimitaciones para su fácil comprensión.

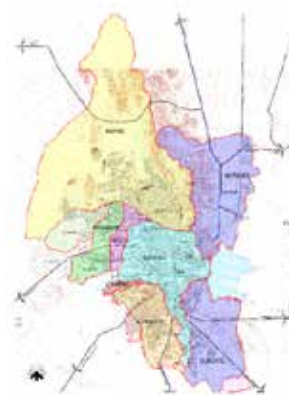


Figura 2. Clasificación de ámbitos de estudio de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Fuente: IMPLAN, 2018.



Temporalidad del estudio

El estudio es de tipo no experimental, transversal y descriptivo, debido a que no es necesaria la manipulación de variables, la recolección de datos se llevó a cabo entre los meses de marzo a agosto del 2018, el propósito original es realizar análisis de integración de isovistas al igual que la integración de podrían calcularse las líneas axiales. Ahora se ha desarrollado en varias direcciones diferentes, por lo que se ha convertido en más cerca de un sistema GIS tradicional con funciones de análisis para gráficos incorporados. Al hacerlo, ha adquirido características disponibles en otro software de sintaxis espacial, incluidas nuevas medidas y análisis del espacio, incluyendo herramientas basadas en agentes, generación de mapas axiales y análisis de segmentos angulares (Turner, 2007).

BASES CONCEPTUALES E INSTRUMENTO DE RECOLECCION DE DATOS

Sintaxis espacial

La sintaxis espacial, originada en la década de 1970 por Bill Hillier y sus colegas en The Bartlett School of Architecture, University College London, es una teoría y un método para el análisis espacial relaciones. En su contexto más amplio, la sintaxis espacial es un conjunto de técnicas que se pueden aplicar individualmente y en diferentes combinaciones entre sí. La combinación de estas diferentes técnicas analíticas depende de la(s) pregunta(s) de investigación o diseño urbano y planificación, para uno o varios sistemas urbanos bajo escrutinio (van Nes, 2021).

Conectividad

El análisis de conectividad de Space Syntax ha asegurado que la calle Al Souk era un eje principal para los

visitantes, y que se vio afectada negativamente por el uso comercial no planificado y el desorden de los vendedores, que han confundido la imagen del núcleo histórico (Hegazi, 2019). Para determinar el nivel de conectividad, cálculos del número total de configuraciones espaciales contenidas en la línea axial de las localidades de estudio. La determinación de la configuración del espacio se realiza observando el número de líneas axiales conectadas a la línea axial que se va a calcular para determinar el número de posibles interacciones que ocurren en el espacio. La configuración de cantidad de espacio indicará entonces el valor de conectividad propiedad de la línea axial (Navastara, 2018).

Integración

Otra variable es la integración, los valores de integración presentan un medio viable para determinar el uso del espacio a través de una evaluación cuantitativa de la permeabilidad de una configuración espacial. Los valores de integración también son representativos de la fortaleza o debilidad de las relaciones sociales dentro de un espacio. El grado de diferencia entre tres o más espacios como en (1) se llama factor de diferencia:

$$H = -(a/t \times \ln(a/t) + b/t \times \ln(b/t) + c/t \times \ln(c/t)) \quad (1)$$

donde H es el factor de diferencia no relativizado para tres espacios: a, b y c en la configuración y t es la suma de los tres espacios, es decir, $t = \Sigma(a+b+c)$. H puede relativizarse entre $\ln 2$ y $\ln 3$ para obtener el factor de diferencia relativa (H^*), que varía entre 0 y 1. $H^* = 0$ corresponde a la diferencia máxima, es decir diferenciación funcional fuerte, mientras que $H^* = 1$ corresponde a la mínima o nula diferenciación funcional (Sanni-Anibire et al, 2018).





Profundidad

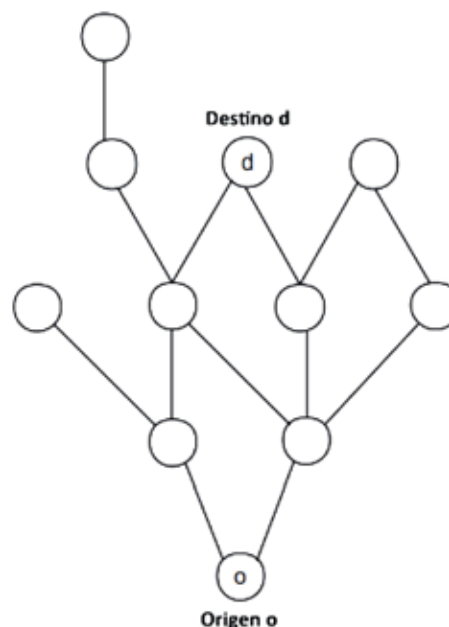
La profundidad topológica desde el espacio privado hasta el espacio público se cuenta considerando cuántos espacios separan la entrada del edificio y el espacio público más cercano. Si hay una entrada directa desde un edificio a la calle, la profundidad topológica es igual a 0. Si hay otro espacio (por ejemplo, un espacio semiprivado como un mini jardín o un área con césped), la profundidad topológica es igual a 1. Si hay dos espacios separando el espacio principal (segmento de la calle) de la entrada del edificio, entonces la profundidad topológica es igual a 2. También, se pueden formar dos espacios de separación en el caso de que los espacios estén separados por cercas o setos casi transparentes o no transparentes u otro elemento. El espacio se percibe en la investigación solo cuando un ser humano parado en cualquier rincón interior del espacio puede ver todos los demás rincones de este espacio. Otros estudios presentan una metodología mixta para mapear y analizar la conectividad espacial de los caminos cotidianos que unen la puerta de entrada de las ubicaciones de trabajo y hogar de un individuo con la calle comercial principal local. Estas vías incluyen calles públicas, carriles semiprivados, callejones y escaleras (Thai, 2022).

Elección

Por último, la medida de elección vino originalmente de visualizar la red espacial como un gráfico justificado. Considere el gráfico simple que se muestra en la Figura 3 en el que un espacio, la raíz, se marca "o", que significa origen, y otro se marca "d" para el destino, lo que indica que estamos interesados en el movimiento entre estos dos espacios. Primero, imagine que el gráfico es una red flexible. Recogemos "o" y "d", tiramos de la red con fuerza. Todos los nodos que se encuentran en las rutas más simples entre

"o" y "d" son entonces ajustados, y los demás se cuelgan. Eliminamos los nodos colgantes sueltos ya que no están en las rutas más simples entre "o" y "d", y luego tomamos cada nivel en la red estrecha y estiramos cada uno a su ancho natural. La medida de elección determina la cantidad de movimiento que pasa a través de cada elemento espacial en viajes más cortos o simples entre todos los pares de elementos espaciales en un sistema (de nuevo hasta cierto radio y dada una definición de distancia), y por lo tanto corresponde a la interrelación matemática. A menudo decimos que la integración representa el potencial de movimiento de un espacio, y elegimos el potencial de movimiento total, señalando también que las dos medidas corresponden a los dos elementos básicos en cualquier viaje: seleccionar un destino de un origen (integración), y elegir una ruta, y así los espacios para pasar entre el origen y el destino (Hillier, 2012).

Figura 3. Origen y destino en el espacio.



Fuente: Depthmap, 2015.

En otros estudios, tienen como propósito evaluar y comparar la calidad espacial de los hospitales de ambos países utilizando un enfoque de sintaxis espacial y observación de campo. Muchos estudios examinaron la calidad espacial de los hospitales, pero falta una investigación comparativa entre los hospitales chinos y australianos (Geng, 2021).

Estudio axial de la ciudad a través de la herramienta depthmap

Una de las herramientas informáticas capaz de realizar análisis en sintaxis espacial es Depthmapx, este software es una herramienta para el análisis topográfico, en el cual, las

capas a analizar son archivadas mediante la yuxtaposición de los gráficos, a lo que también los gráficos son analizados.

Los análisis posibles en Depthmapx, son: Convex Space Analysis, Axial Line Analysis, Segment Analysis, Visibility Graph Analysis (incluyendo isovist y campos isovist) (Depthmapx, 2015).

Estos son gráficos donde los nodos son líneas y bordes son intersecciones entre líneas, es decir, los gráficos secundarios desarrollados a partir de mapas representados en el gráfico.

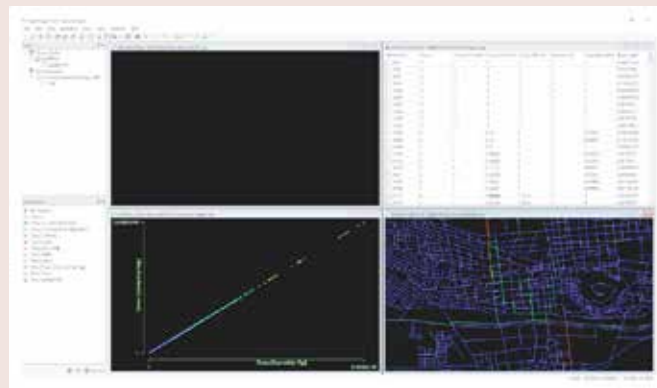
El procedimiento para realizar el análisis axial es el siguiente:

1. Archivo, nuevo.
2. Mapa, importación (elija uno de los archivos DXF con líneas axiales).
3. Mapa, Mapa convertir dibujos. En "nuevo tipo de mapa", seleccione "mapa axial".
4. Herramientas, Axial.
5. El resultado del análisis axial es el estudio Elección, Conectividad, Integración y Profundidad.
6. Algunas líneas axiales son en color rojos y los no ligados son azules. En la columna de la conectividad con los valores 0 son las líneas no ligados. Igualmente, líneas con el valor -1 son también líneas no ligados. Los valores de conectividad varían desde 1 a 8, entre mayor sea este valor, mayor será el valor de la medida de estudio en el eje vial, para valores mayores el eje vial se tornará de color rojo y entre menos sea el valor de conectividad el eje vial se tornará de color azul intenso.
7. Archivo, Guardar como (dar el nombre al archivo, por ejemplo "mapa axial de caso de estudio").

En la Figura 4, se muestra la interface de Depthmapx, divide en tres esquemas: el mapa axial, el gráfico del comportamiento de las medidas de sintaxis espacial, y la tabla de resultados de las medidas. A continuación, se

describen los materiales y métodos, los cuales muestran la elaboración y aplicación que permiten la fiabilidad y calidad de los resultados del estudio.

Figura 4. Interface del software de sintaxis espacial Depthmapx.



Fuente: Elaboración propia realizada con Depthmap.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis de las medidas de sintaxis espacial en la ciudad de Hermosillo, Sonora, se muestran a continuación.

Sintaxis espacial en el entorno urbano de Hermosillo

La sintaxis espacial determina los principales factores visuales y morfológicos de la trama urbana que desempeñan un papel fundamental en el establecimiento del equilibrio entre la imagen de la ciudad como un fenómeno físico, y a su vez, esta imagen creada por la difusión comercial y turística (Lazo, 2012).

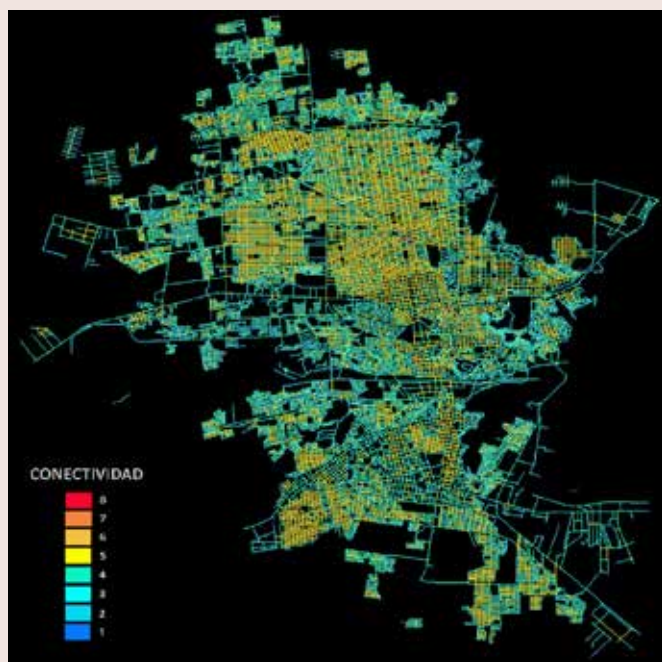
Sintaxis espacial conectividad

Los resultados de la medida de conectividad muestran en el mapa axial que la mayoría de los ejes viales localizados en el centro histórico de la ciudad tienen un



valor 5 de conectividad; la mayoría de los de los ejes viales que contienen más conexiones se encuentran aislados del centro histórico de la ciudad y cada uno de ellos integran esqueletos axiales aislados, formándose así, los siguientes esqueletos: en el sur de la ciudad, las calles Nardo Final y Juan Romero, localizadas en la colonia Arcoíris; en el centro de la ciudad, se presenta una fuerte conectividad en las calles Abelardo L. Rodríguez, José María Yáñez y Abelardo L. Rodríguez, Concepción L. de Soria y San Luis Potosí; en el poniente de la ciudad, la calle Fernando Bernal, localizada en la colonia El Llanito, muestra una conectividad alta; finalmente, en el norte de la ciudad es donde se observan más esqueletos axiales con conectividad alta, en las calles, Leocadio Salcedo, Guadalupe Victoria, Ángel García Aburto y General Miguel Plata, localizadas en la colonia Balderrama. También, el esqueleto axial formado por Villa Hidalgo, de las Torres, ubicadas en la colonia Lomas de Linda Vista, así como las calles Atardeceres y Donato Guerra, en la colonia Mártires de Cananea. Respecto a los ejes viales con poca o nula conectividad se encuentran en la periferia de la ciudad, las calles con mayor conectividad se muestran en color rojo y tienen una conectividad de 8; mientras que las de menor conectividad son los ejes viales en color azul y tienen un valor de 1, esto se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Sintaxis espacial conectividad de la ciudad de Hermosillo, Sonora.



Fuente: Elaboración propia.

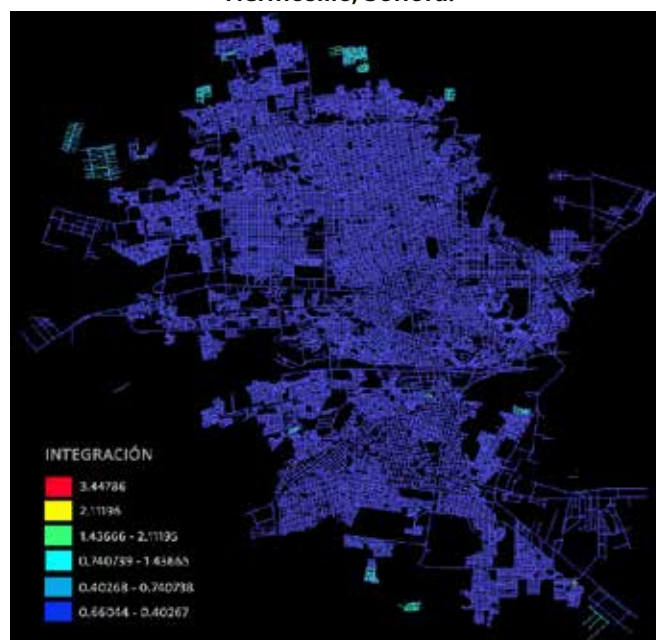
Sintaxis espacial integración

Los resultados para la integración de los ejes axial muestran fuerte tendencias en valores altos y medios en la periferia de la ciudad, estas, se encuentran localizadas lejos



del centro, a excepción del esqueleto axial conformado por Real de San Pablo, Los Mesquites, y los Pablitos, ubicada en la colonia Las Villas. Cabe mencionar que la mayoría de la ciudad tienen valores bajos en integración, puesto que en la Figura 6 se puede observar que esta diferencia es mediante la intensidad del color azul, con valores bajos de integridad de 0.066044 y los valores altos de la medida de integración oscilan entre 1.43666 y 3.44786.

Figura 6. Sintaxis espacial integración de la ciudad de Hermosillo, Sonora.



Fuente: Elaboración propia.

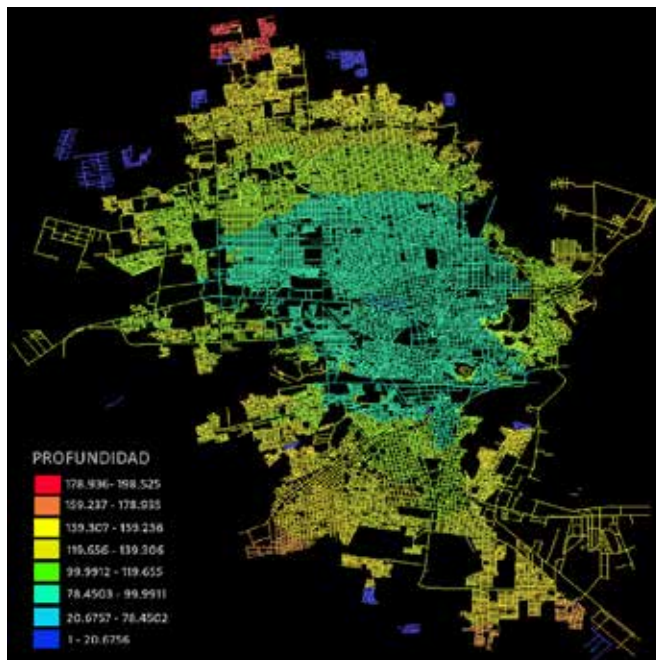
Sintaxis espacial profundidad

En cuanto al estudio de la profundidad, los ejes viales menos profundos, tal y como se muestra en la Figura 7,



se encuentran en el centro de ciudad, aumentando su valor a medida que se alejan del centro, los valores más altos son localizados en la periferia, a excepción de las colonias Las Cuevas, California Residencial, Paseo Villas del Turín, Fraccionamiento Villa Verde sección V, para el norte de la ciudad y para el sur las colonias Quintas del Sol, Fraccionamiento Haciendas del Sur. Los valores más altos de profundidad se representan en color rojo y los más bajos en color azul, con valores altos de 198.525 y bajos de 1.

Figura 7. Sintaxis espacial profundidad de la ciudad de Hermosillo, Sonora.



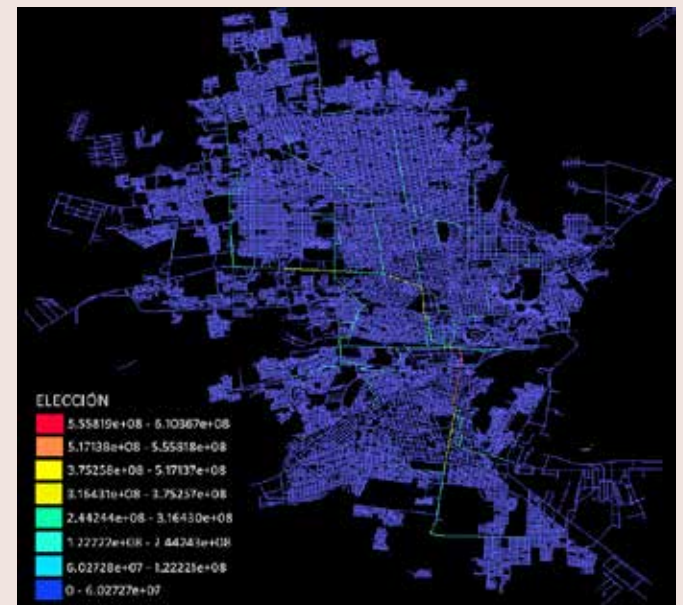
Fuente: Elaboración propia.

Sintaxis espacial elección

En tema del análisis de elección, la Figura 8 muestra que la ciudad presenta valores altos de elección de

6.10367e+08 representados en color rojo intenso y valores bajos de 0 representados en color azul. En la ciudad el esqueleto axial con mayor análisis de elección está conformado por los ejes viales Cultura, Agustín de Vildosola y Paseo Río Magdalena, calles cercanas al Cerro de la Campana, también el Blvd. Luis Encinas, García Morales y Antonio Quiroga presentan valores altos para el análisis de elección, así como el Blvd. Lázaro Cardénas localizado en el norte de la ciudad. Finalmente, para el sur de la ciudad se observa valores altos para el esqueleto axial conformado por las calles Manuel J. Clouthier y Jaudel Zamora Ledesma, en las colonias Santa Fe y Altares.

Figura 8. Sintaxis espacial elección de la ciudad de Hermosillo, Sonora.



Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los hallazgos revelan que la integración de los ejes axial muestra fuerte tendencias en valores altos y medios

en la periferia de la ciudad, en el documento “El desarrollo de la configuración espacial residencial para la privacidad visual en las viviendas iraníes, un enfoque de sintaxis espacial” (Ravari, 2022) se menciona que, la reducción en la integración espacial corresponde al aumento de la segregación que permite una mayor privacidad visual. El estudio sustenta que, incluso con las limitaciones en la escala de la casa y la reducción en el número de nodos, como se evidencia en el diseño de la distribución residencial moderna, el nivel eficiente de privacidad visual aún es alcanzable con respecto a los estándares exigidos por la cultura local.

Los resultados de la medida de conectividad muestran en el mapa axial que la mayoría de los ejes viales localizados en el centro histórico de la ciudad tienen mayor conectividad, la mayoría de los ejes viales que contienen más conexiones se encuentran aislados del centro histórico de la ciudad, Hegazi menciona que gracias al análisis de conectividad fue posible sugerir la reubicación requerida del mercado y los vendedores ambulantes a las calles menores de Rosetta, Egipto (Hegazi, 2019).

En cuanto al estudio de la profundidad, los ejes viales menos profundos, se encuentran en el centro de ciudad, Arslan realizó un estudio en treinta casas para ser analizadas a los efectos de este estudio para revelar las diferencias considerando la profundidad espacial, la interpenetración y la densidad para definir organizaciones más implícitas que puedan expandirse constantemente y acomodar diferentes espacios funcionales en un espacio abierto con la ayuda de identificadores espaciales (Arslan, 2017).

Finalmente, para el sur de la ciudad se muestran los valores más alto en el indicador de elección, este describe

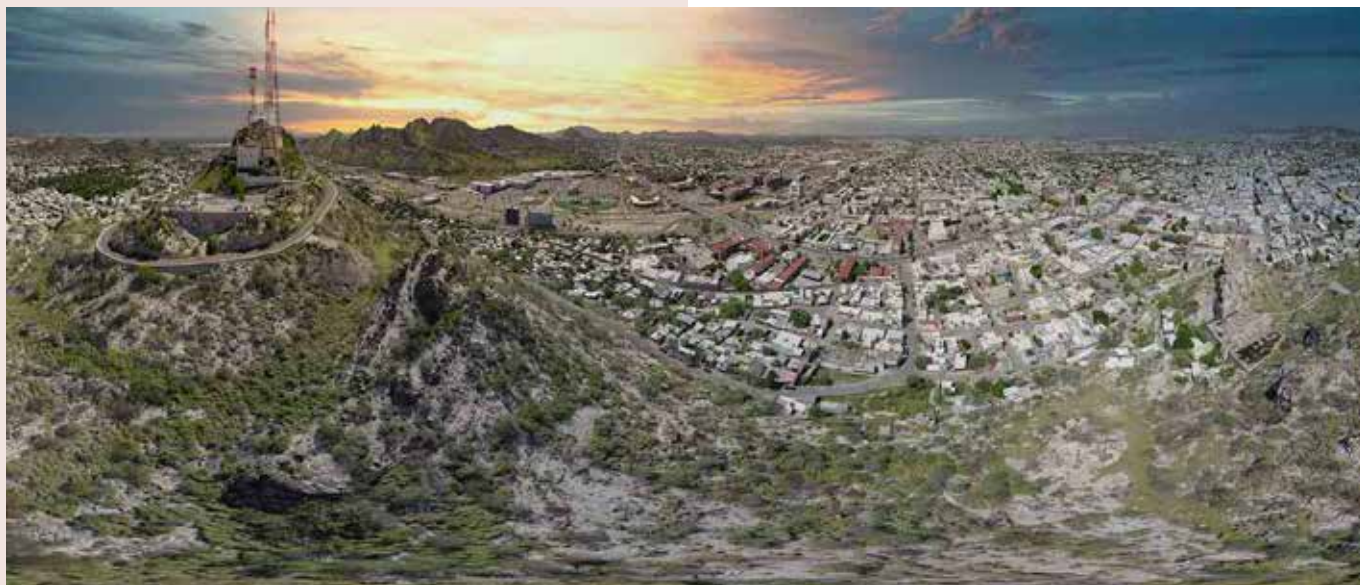
la probabilidad de que pase por el segmento en los viajes y, por lo tanto, es potencial como ruta, de todos los segmentos a todos los demás. De nuevo, este atributo espacial puede definir el tipo de uso del suelo que encajaría mejor en este espacio, posiblemente ciertos usos del suelo requerirían espacios con una alta integración valor (Lida, 2005).

CONCLUSIONES

Los resultados que se obtienen en sintaxis espacial pueden aportar gran información para la toma de decisiones en temas de planificación urbana o mejora de algún ámbito de estudio, puesto que la sintaxis aporta una visión más amplia en cuanto al comportamiento de la red urbana, cara a probables modificaciones o análisis a realizarse en distintos programas de mejora urbana.

Siguiendo las delimitaciones en la ciudad, realizadas por Depthmap se muestran los valores más altos de las medidas para cada ubicación geográfica de la ciudad, en donde se observa que, los ejes viales con mayor conectividad se encuentran ubicados en el norte, centro y suroeste de la ciudad; los ejes viales con mayor integración y profundidad se localizan al norte de la ciudad; y los de mayor elección en el centro de la ciudad.

Para concluir, mediante la sintaxis espacial es posible analizar las posibles aperturas de zonas verdes; que, gracias a la configuración espacial, la primordial pauta de movilidad de los sujetos, permite realizar modificaciones de peatonización en ámbitos de interés; mejoras en el tráfico vial de coches, fortalecer programas turísticos, factibilidad de nuevos comercios en la ciudad, ya que estos, requieren flujo peatonal en ejes viales, el cual faciliten la accesibilidad a dichos comercios.



Lo anterior se respalda, mediante lo concluyente por parte de Lamiquiz (2011) en su tesis doctoral, en donde menciona que la mayoría de los autores de la sintaxis espacial argumentan que la accesibilidad configuracional, a través de su influencia en el movimiento, podría afectar la distribución del uso de la tierra; por lo tanto, podría venir antes de que la influencia de la densidad y el uso de la tierra se mezclen con los peatones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Martínez, "Configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con volúmenes vehiculares", *Revista Infraestructura Vial*. 2017, vol. 19, No. 34, págs. 18-27.
- [2] Depthmapx, Recuperado 18 de Enero, 2015, de <http://www.spacesyntax.net/>.
- [3] F. Holanda, "O espaço de exceção". Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2002, pp. 97.
- [4] S. Ronchi, "Un indicador de morfología urbana para la planificación del paisaje en Lombardía (Italia)", *Gestión de la Calidad Ambiental*. 2018, vol. 29, No. 4, págs. 623-642. <https://doi.org/10.1108/MEQ-05-2017-0048>
- [5] J. Uribe, "Hermosillo Siglo XX". 2ª ed. Publicaciones la Diligencia, 2018.
- [6] INEGI. (2020). Panorama sociodemográfico de Sonora 2020. Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/poblacion/>
- [7] B. Hillier, "A theory of the city as object: or, how spatial laws mediate the social construction of urban space". *Urban Design International*, 2002.
- [8] S. Geng, "Análisis comparativo de entornos hospitalarios en Australia y China utilizando el enfoque de sintaxis espacial", *Revista internacional de patología y adaptación de la construcción*. 2021, vol. 39, No. 3, pp. 525-546. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2020-0031>
- [9] Lagarda, I., Noriega, J., & Vázquez, M. (2009). *Hermosillo a través de los mapas*. Hermosillo, Sonora: El autentico S.A. de C.V.
- [10] IMPLAN, Recuperado 30 de Julio, 2018, de http://implanhermosillo.gob.mx/metro/pdf/D1_CUENCAS.pdf.
- [11] A. Turner, "UCL Depthmap 7: From Isovist Analysis to Generic Spatial Network Analysis". *New Developments in Space Syntax Software*, ITU Faculty of Architecture, Istanbul 2007.
- [12] A. van Nes, "Introduction to Space Syntax in Urban Studies", Springer, 2021, pp. 5-265.
- [13] Y.S. Hegazi, "Reimaginar el núcleo histórico de Rosetta a través de la sintaxis espacial", *Archnet-IJAR*. 2019, vol. 13, No. 3, pp. 645-669. <https://doi.org/10.1108/ARCH-05-2019-0109>
- [14] A.M. Navastara, "Application of space syntax method to measure spatial connectivity in campus of Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, num. 202, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/202/1/012015>
- [15] M.O. Sanni-Anibire, M.A. Hassanain, A.S. Mahmoud, W. Ahmed, "An evaluation of the functional performance of research and academic laboratories using the space syntax approach", *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 2018, Vol. 36 No. 5, pp. 516-528. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2018-0028>
- [16] H.M.H. Thai, "Mapeo y medición de la conectividad espacial de los caminos hacia los negocios

- en el hogar dentro de contextos urbanos informales", *Archnet-IJAR*. 2022, vol. 16, No. 1, pp. 90-111. <https://doi.org/10.1108/ARCH-02-2021-0034>
- [17] B. Hillier, "Normalización de la opción de ángulo mínimo en Depthmap y cómo abre nuevas perspectivas en el análisis global y local del espacio de la ciudad". *The Journal of Space Syntax*, 2012, Vol. 3, pp. 155-160.
 - [18] S. Geng, "Análisis comparativo de entornos hospitalarios en Australia y China utilizando el enfoque de sintaxis espacial", *Revista internacional de patología y adaptación de la construcción*. 2021, vol. 39, No. 3, pp. 525-546. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2020-0031>.
 - [19] Depthmapx, Recuperado 18 de Enero, 2015, de <http://www.spacesyntax.net/>.
 - [20] F. Lazo, "City's imaginary / imaginary for the city. The paradigm of the commercial image in the tourist city. Barcelona Case". *Universidad Politécnica de Catalunya*, 2012, pp. 1-19.
 - [21] K. Ravari, "The development of residential spatial configuration for visual privacy in Iranian dwellings, a space syntax approach". *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 2022, <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2021-0080>.
 - [22] Y.S. Hegazi, "Re-imagining Rosetta historic core through Space Syntax", 2019, *Archnet-IJAR*, Vol. 13 No. 3, pp. 645-669.
 - [23] A. Arslan, "Small House Spatiality: A Comparative Space Syntax Application", *Open House International*, 2017, Vol. 42 No. 2, pp. 58-67. <https://doi.org/10.1108/OHI-02-2017-B0009>.
 - [24] S. Lida, "Network and Psychological Effects in Urban Movement", In A.G. Cohn & A.D. Mark (eds), *COSIT 2005, LNCS 3693*, 2005, pp. 475-490.
 - [25] F. Lamiquiz, "Implicaciones de la accesibilidad configuracional en la movilidad peatonal. El caso de Madrid". *Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid*, 2011, pp. 5-410.

Cómo citar este artículo:

Ramírez Uribe, G., García Arvizu, J. F., Ojeda de la Cruz, A., Quintana Pacheco, J., & Miranda Pasos, I. (2022). Análisis de la conectividad urbana de la ciudad de Hermosillo, Sonora. *EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.247>



Las redes de Petri y su adopción en programas de la Universidad de Sonora

Petri nets and their adoption in programs of the university of Sonora

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Eleazar Jimenez Serrano ¹

Recibido: 29 / 01 / 2022

Aceptado: 26 / 09 / 2022

Publicado: 21 / 10 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.221>

Autor de Correspondencia:

Eleazar Jiménez Serrano

Correo: eleazar.jimenez@unison.mx

Resumen

Las redes de Petri (PN) pertenecen a una técnica que está ganando popularidad en diferentes sectores industriales, como el automotriz. En este manuscrito se explican brevemente las PN, su historia y algunas extensiones para aumentar las capacidades en la modelación. Asimismo, dos ejemplos de modelos de PN para la industria automotriz, uno para la verificación de un software para el cálculo de posicionamiento vehicular por GPS, y el segundo para la simulación de una cadena de suministro automotriz. Al final se incluye una breve conclusión orientada a su adopción en los programas del departamento de ingeniería industrial de la Universidad de Sonora (UNISON).

Palabras clave: edes de Petri, simulación de sistemas de manufactura, verificación de software

Abstract

Petri nets (PNs) belong to a technique gaining popularity in different industrial sectors, such as the automotive industry among others. Hereby, PN's are briefly explained, including their history and the description of some extensions useful to increase modeling capabilities. Additionally, two examples of PN models for the automotive industry are presented, one for the software's verification on the calculation of vehicle positioning by GPS, and the second for the simulation of an automotive supply chain. In the end, a brief conclusion is included aiming the adoption of PN's in the programs of the department of industrial engineering of the University of Sonora (UNISON).

Keywords: Petri nets, simulation of manufacturing systems, software verification.

¹ Doctor en Ciencias en Ingeniería de la Computación y Comunicación, Universidad de Sonora, Unidad regional central. División de ingeniería. Correo: eleazar.jimenez@unison.mx, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2594-6914>

INTRODUCCIÓN

Un tipo de complejidad en la modelación y simulación de sistemas de manufactura está asociado a la ocurrencia de eventos que pudieran ser secuenciales, asíncronos, paralelos y concurrentes. Por ejemplo, la administración de fabricación y distribución de partes y productos en la industria automotriz a nivel mundial contiene este tipo de eventos: manufactura de componentes en fábricas de proveedores en China, México e India, transportación por mar y tierra de las partes a empresas integradoras de sistemas en Corea de Sur, Brasil y España, y finalmente ensamble de los automóviles en lugares como Japón, Estados Unidos y Alemania [1]. Otro ejemplo donde hay estos eventos es en mecanismos de hardware-software de automóviles con tecnología de los sistemas de asistencia avanzada de manejo, conocidos en inglés como Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) [2]. El análisis, control y diseño de esta tecnología incluye dispositivos tales como receptores GPS, sensores infrarrojos, radar, cámara y monitor, todos trabajando al mismo tiempo en forma sinérgica.

Las redes de Petri son una técnica relativamente nueva conocidas en inglés como Petri Nets, y llamadas a lo largo de este manuscrito con las siglas PN. Esta técnica está diseñada para modelar y simular sistemas que presentan precisamente eventos secuenciales, asíncronos, paralelos y concurrentes. Tienen su origen a inicios de la década del año 1960, pero están teniendo más popularidad recientemente gracias a los avances tecnológicos en computación.

Este manuscrito presenta las PN como una técnica útil en la simulación y verificación de sistemas. En la siguiente sección se hace una introducción básica de las PN, seguido de aquellas extensiones más útiles y populares. Luego se presentan dos modelos como ejemplos. El primero es del algoritmo computacional para calcular posicionamien-

to vehicular usando señales de GPS. El segundo es de un sistema general de cadenas de suministros en la industria automotriz. Al final se incluye una pequeña sección explicando los beneficios que traería la adopción de PN en los programas de ingeniería industrial de la Universidad de Sonora (UNISON), una universidad que está en un estado con una economía industrial que incluye el sector automotriz.

Redes de Petri

Las PN tienen su origen en una investigación documentada por el doctor alemán Carl A. Petri en 1962 para su trabajo de tesis doctoral en la Universidad de Bonn [3]. Se utilizaron en un principio como un modelo de computación para simular tareas concurrentes en sistemas distribuidos y complejos, un área exclusiva de las ciencias de la computación para el análisis y la verificación de sistemas. Tiempo después ganaron popularidad mundial cuando se usaron con más frecuencia en la década de los noventa para simular otros sistemas más comunes. Por ejemplo, líneas de producción, procesos de servicios bancarios, cadenas de suministros, entre otros.

Las PN tienen un fundamento matemático elegante y sencillo, muy similar a las cadenas de Markov. El tratamiento de la matriz de transiciones de estados está en el dominio de los números enteros. Su representación gráfica explícita permite la visualización del comportamiento dinámico de los resultados de la simulación, algo que los software comerciales nuevos de modelación y simulación están explotando para su popularización.

Es en este siglo veintiuno cuando se materializó el crecimiento exponencial que predijo la ley de Moore respecto al poder computacional. Es también cuando las PN y otros métodos matemáticos que utilizan matrices grandes y requieren mucha memoria se pudieron volver comerciables





en todos los sectores industriales, de servicio, de investigación, educación, etc. Un ejemplo claro es el trabajo realizado en [2] en la industria automotriz.

Redes generales de Petri

La forma general de las PN que presentó el Dr. Petri en 1962 es una representación matemática y gráfica de un sistema a eventos ocurriendo en intervalos discretos en el cual se pueden representar diferentes topologías de sistemas complejos y sus estados, sean estos distribuidos, concurrentes y paralelos.

En su representación gráfica bipartita unidireccional solamente emplea cuatro elementos llamados: condiciones (o places en inglés y descritos con círculos), transiciones (dibujados con rectángulos), arcos y tokens (que son puntos negros adentro de las condiciones). En la figura 1 se identifican estos elementos enumerados según el tipo, algo útil para la identificación gráfica y en la programación para el cómputo.

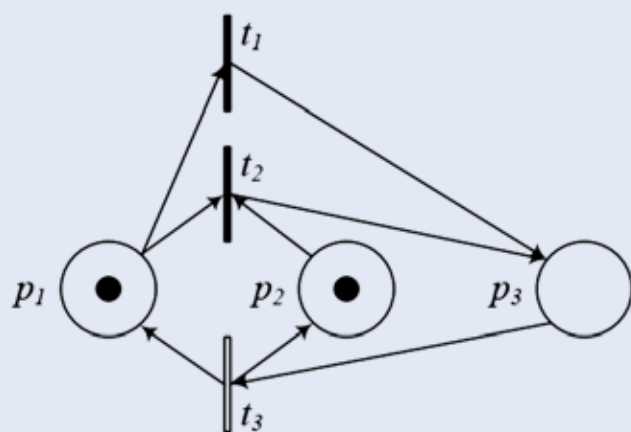


Figura 1. Ejemplo con tres condiciones, tres transiciones y dos tokens.

Las diferentes combinaciones del número de tokens adentro de las condiciones se denominan marcas (markings en inglés), representan los estados de un modelo de PN, y cada marca se representa con un vector m en el dominio de número enteros positivos de tamaño acorde al número de condiciones. Para el ejemplo en la figura 1, la marca actual es $(1, 1, 0)$.

Las reglas para conectar condiciones y transiciones indican usar arcos unidireccionales y no permiten conectar dos elementos iguales. Dichas conexiones se representan con dos matrices en el dominio de número enteros positivos. Para el ejemplo en la figura 1, las dos matrices correspondientes se muestran en los incisos a y b de la figura 2.

a)	t1	t2	t3	b)	t1	t2	t3	c)	t1	t2	t3
p1	1	1	0	p1	0	0	1	p1	-1	-1	1
p2	0	1	0	p2	0	0	1	p2	0	-1	1
p3	0	0	1	p3	1	1	0	p3	1	1	-1

Figura 2. Matriz de entrada, de salida, y de transición (resta de b menos a).

Las condiciones conectadas por detrás de las transiciones también se conocen como precondiciones, y las conectadas por delante como postcondiciones. La representación matricial de cómo condiciones y transiciones se conectan permiten calcular la matriz de transición, que para el ejemplo en la figura 1 se muestra en el inciso c de la figura 2.

La fórmula matemática para calcular el cambio de los tokens en las condiciones de la red, la progresión desde una marca actual a una siguiente, es con la siguiente ecuación de transición:

$$m_{siguiente} = m_{actual} + (matriz_{de\ transición}) \cdot vector_{transiciones\ activas\ por\ disparar} \quad (1)$$

La ecuación usa un vector que indica qué transiciones están activas por disparar y ejecuta el comportamiento dinámico. Es de notar que incluye la suma de la marca del estado actual para calcular la marca siguiente. El resultado representa la ejecución de un paso discreto en la simulación.

Las redes de Petri en la configuración general tienen las siguientes características: la capacidad de tokens en las condiciones es de uno, todos los arcos tienen un peso de uno, y la regla para determinar si una transición está activa requiere que cada precondition tenga un token y cada postcondición tenga cero tokens. Todo esto se pone en un algoritmo que se computa de manera secuencial mediante iteraciones en una cantidad de ciclos que depende del tipo simulación, pudiendo ser de exploración exhaustiva o parcial.

En el caso de transiciones activas por disparar en conflicto como el ejemplo en la figura 1, que es dos o más transiciones compartiendo al menos una precondition, la regla de solución puede ser selección aleatoria u alguna otra selección personalizada. Para el caso del ejemplo, si la transición uno fuera la seleccionada a disparar entonces el vector sería (1, 0, 0) y la marca siguiente sería (0, 1, 1).

extensión PRINCIPAL de las redes de Petri

Por el enorme potencial de las PN, desde la década del año 1980 otras capacidades se le han agregado en forma de extensiones. Estas se utilizan para el modelado, análisis, simulación, verificación, control y diseño de sistemas dinámicos, como líneas de producción, procesos de servicios bancarios, cadenas de suministros, etc.

La extensión más común se conoce en inglés como Place/Transitions nets [4]. Esta es la extensión más popular como se conocen las PN y es hoy en día el algoritmo predeterminado. Su configuración es: permite definir una capacidad de más de un token en las condiciones, permite arcos con un peso mayor a uno, y la regla para determinar si una transición está activa se extiende para requerir en cada postcondición que el número actual de tokens más el peso del arco de entrada sea menor o igual que la capacidad de tokens.

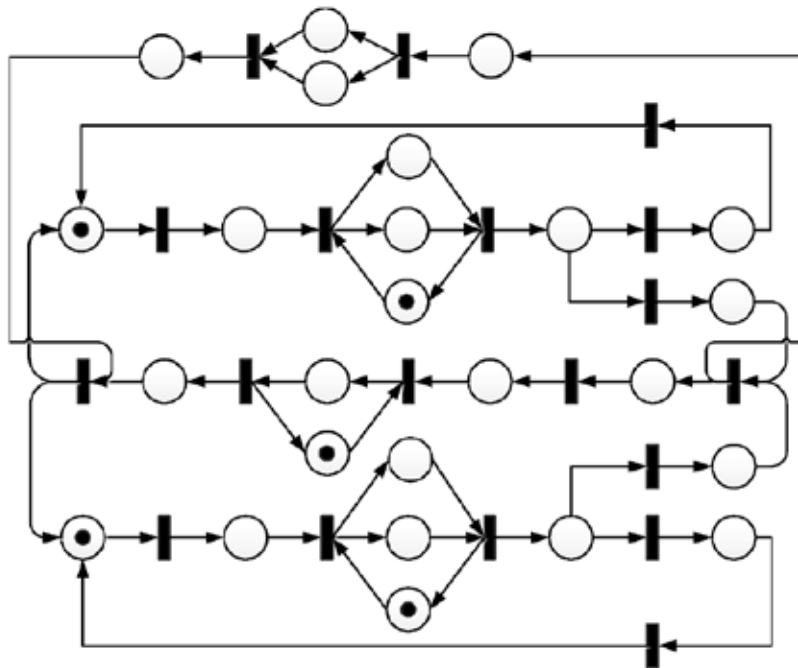


Figura 3. Modelo de red de Petri de un sistema de manufactura flexible.



El ejemplo en la figura 3 proviene de un modelo de un sistema de manufactura flexible presentado en [5]. Se utilizó para simular diferentes escenarios de velocidad de líneas de producción, identificar cuellos de botella y estaciones de trabajo con tiempo muerto, así como estimar el volumen de producción.

Cada una de las 19 transiciones representa una estación de trabajo. Cada precondition es un inventario en la estación de trabajo, el número de tokens es el tamaño del inventario sea de partes o del producto, y el disparo de una transición activa es el término de la operación de producción en la estación. Cada marca del modelo es un vector de 25 componentes (son 25 condiciones) y simboliza un estado en la progresión de la producción en el sistema. La modelación del tiempo de operación de una estación de trabajo se consigue con una extensión de PN con tiempo la cual se presentará a continuación.

Redes de Petri para simulaciones en tiempo continuo

Hay veces que se necesita crear modelos de PN fuera del dominio de pasos a tiempos discretos. Esto para agregar por ejemplo la ocurrencia de las transiciones en el dominio del tiempo continuo, incluir disciplinas prioritarias para dichas ocurrencias, determinar el tiempo de espera de partes o productos en los inventarios bajo disciplinas de salida como la FIFO y la FILO, así como el tiempo que pasa una transición sin disparar. Las siguientes son algunas extensiones de PN útiles para esto.

Redes de Petri CON TIEMPO

El requerimiento de incluir la dependencia del tiempo en el comportamiento dinámico de los modelos al momento de ejecutar la simulación en la actualidad es principalmente para fines de verificación de sistemas que se ejecutan en tiempo real [8], como sistemas automotrices. Sin embargo, esta extensión ha tenido popularidad también en sistemas más sencillos.

Esta extensión se consigue agregando un reloj global a la ejecución, una variable numérica acumulativa en el programa. Luego se crea un vector de tiempo de transición de tamaño al número de transiciones, los valores son unidades de tiempo en términos del reloj. Al algoritmo de PN se le agrega una rutina para ejecutar el comportamiento dinámico siguiendo los tiempos en el vector.

En términos gráficos no existe un elemento que se agregue al modelo de PN. Sin embargo, a nivel de software de aplicación, es común visualizar el reloj global en primer plano durante la simulación.

Redes de Petri ESTOCÁSTICAS

Esta extensión está diseñada para incluir el comportamiento aleatorio de cuándo ocurren las transiciones en el tiempo [9]. Distribuciones de probabilidad, como la exponencial, pueden ser usadas para determinar este tiempo, y los valores son los mismos parámetros usados en la teoría

de líneas: tiempos de llegada, de ejecución del evento, y de salida.

El vector de transición mencionado anteriormente en las PN con tiempo se utiliza aquí de la misma manera, los valores son unidades de tiempo, pero se obtienen de la función de distribución de probabilidad asignada. En términos gráficos no hay componentes nuevos. Los tiempos pudieran agregarse al modelo de PN para ayuda visual exclusivamente.

Ejemplo de red de Petri para la ingeniería de software

Las PN comenzaron como un modelo computacional teórico explicando la teoría de computabilidad usando autómatas abstractos, hasta llegar a lo que se conoce como la teoría de redes de Petri [3]. De allí quizás que la verificación de algoritmos, software y sistemas de cómputo fuera una de las áreas iniciales de desarrollo.

El siguiente ejemplo demuestra el uso de PN en la ingeniería de software. Está tomado del algoritmo general disponible públicamente para calcular el posicionamiento utilizando datos de observación de satélites GPS [2]. El programa está fuera del alcance de este manuscrito, pero en breve se describe de la siguiente forma: utiliza datos decodificados y satelitales para calcular el posicionamiento del receptor, hay suposiciones para categorizar los datos GPS como buenos o malos, y define que hay buenos datos en el caso de tener al menos 4 satélites GPS a la vista. El algoritmo requiere buenos datos por 2 ciclos consecutivos para fijar el posicionamiento y poder extrapolar 1 ciclo en el caso de tener malos datos en el próximo.

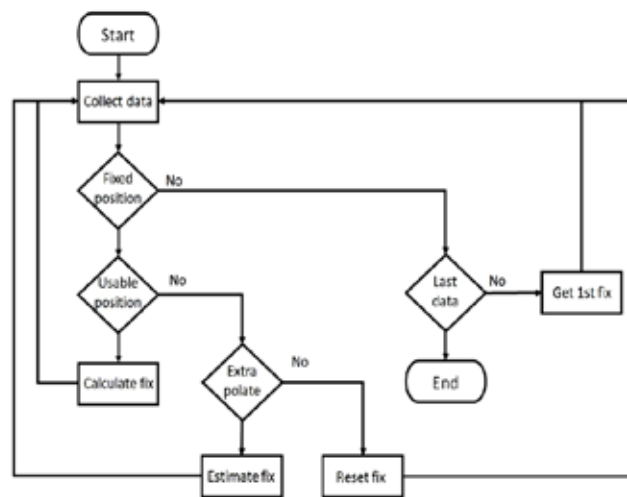


Figura 4. Diagrama de flujo de los estados del sistema de posicionamiento GPS.

Al hacer un modelo de PN, hay diferentes niveles de abstracción del algoritmo en los que nos podemos enfocar. En este manuscrito únicamente se incluirá el nivel de la máquina de estados.

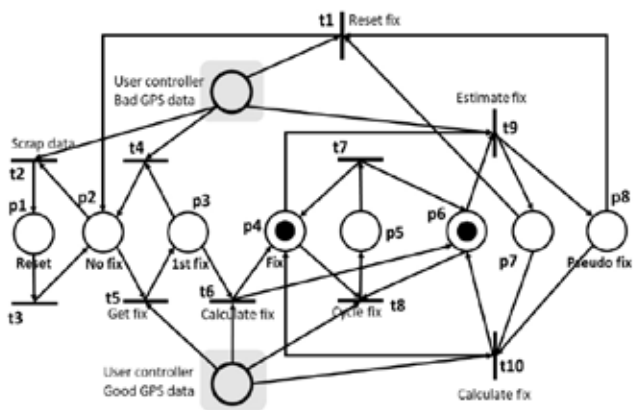
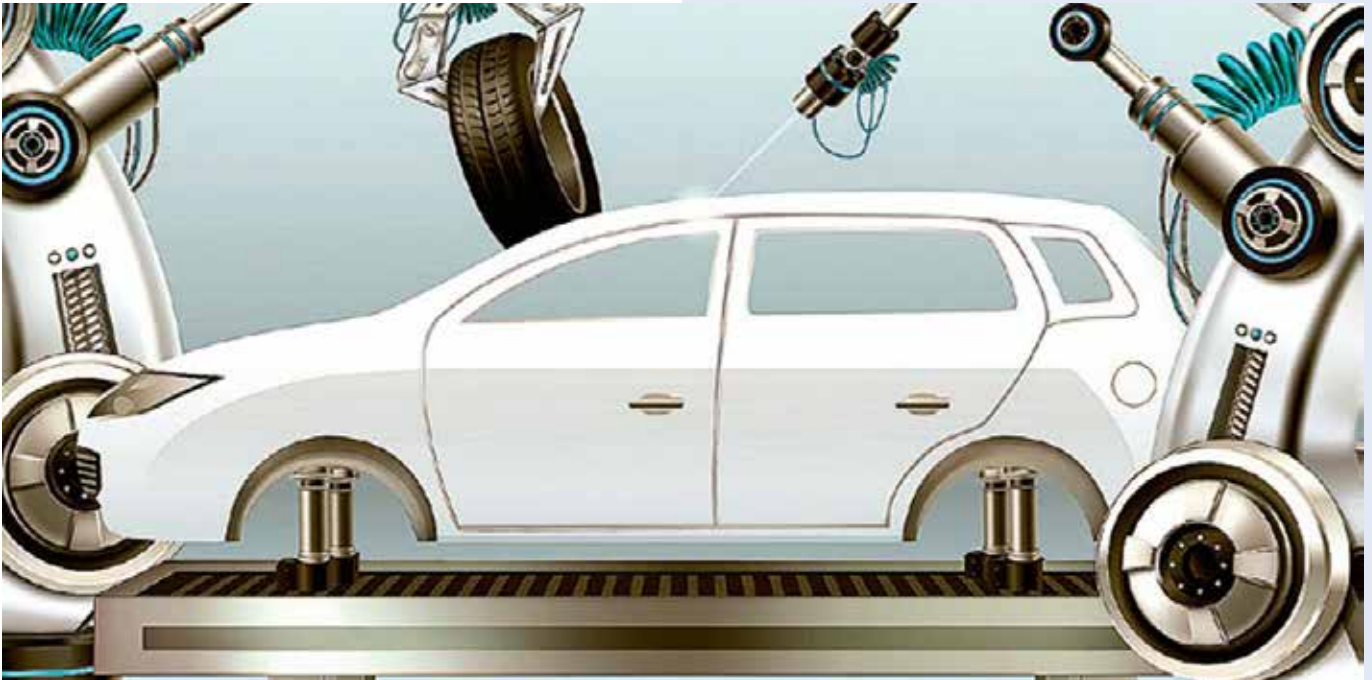


Figura 5. Modelo de red de Petri para el sistema de posicionamiento GPS.

El modelo de PN tiene 10 condiciones de las que 5 representan el estado en el que se encuentra el receptor en el cálculo de la posición. La marca inicial es (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) y correspondería a un token en la condición p2 (No fix). La marca actual en la figura 5 es (0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0). El control de la progresión de los estados lo determina las dos condiciones que categorizan los datos GPS como buenos o malos. El modelo tiene un comportamiento de exclusión mutua para el caso de determinar la posición cuando se tiene solamente una estimación.

El resultado de una exploración exhaustiva desde la marca inicial bajo una condición constante de datos GPS buenos verifica la progresión del receptor para fijar el posicionamiento mediante el disparo secuencial de las siguientes transiciones: t5, t6, t8, t7.

Ejemplo de red de Petri para la ingeniería industrial

La cantidad de manuscritos académicos se incrementó indudablemente al utilizar la técnica para la simulación y análisis de sistemas dinámicos, muchos de ellos siendo sistemas de producción. En una simple muestra de publicaciones en el portal Academia® disponibles en línea y filtrando solamente aquellos sobre el tema PN, se encuentran casi dos mil manuscritos en los últimos cuarenta años, mostrando un gran crecimiento de este tipo de temas en los primeros años de la década de 1990.

Enfocados en este manuscrito en una cadena de suministro, existe una forma general de crear un modelo de PN. En esta sección, en la figura 6 se muestra el modelo para la cadena de suministro presentada en [10] para la industria automotriz.

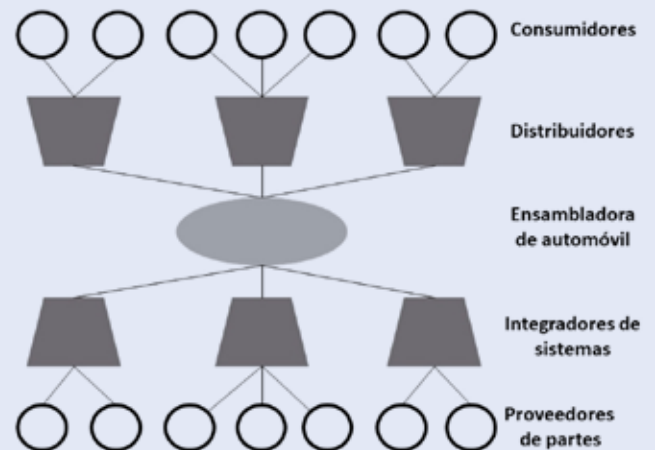


Figura 6. Forma gráfica de una cadena de suministro de la industria automotriz.

Los diferentes actores en la cadena de suministro se representan en un modelo de PN usando condiciones. Los tiempos de transporte, producción y despacho, se presentan en las transiciones como los tiempos de disparo. El comportamiento asíncrono en la simulación se consigue con la extensión de PN estocástica. Las rutas que sigue la cadena de suministro se representan con los arcos que conectan condiciones y transiciones. En las marcas del modelo de PN, el número de tokens representa los inventarios, la cantidad de partes y productos en mano.

La figura 7 muestra un modelo de PN de una cadena de suministros de cinco niveles, comenzando por los proveedores de partes clasificados como Tier-2. La sincronización de la fabricación de los subensambles se observa a nivel de los integradores de sistemas llamados Tier-1. El paralelismo está presente en estos dos niveles. La integración llega a nivel de la ensambladora del automóvil. La sincronización y el paralelismo se observan también en los dos niveles posteriores, en distribuidores y consumidores.

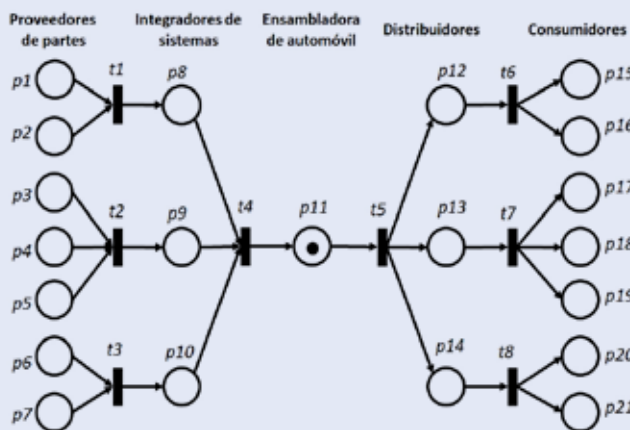


Figura 7. Modelo de PN de la anterior cadena de suministro.

Se nota que para tener un token en la condición p11, esto es tener un automóvil completo y ensamblado, se requirió la participación de todos los proveedores e integradores previos. A nivel de resultado, la suma del número de tokens en las condiciones p15 hasta p21 indican el volumen de producción de automóviles.

CONCLUSIONES

Las redes de Petri desde su inicio han tenido gran impacto en programas de ingeniería de software. Por ejemplo, ya al final de la década del año 1980 el número de publicaciones explicando el uso de PN en la verificación de propiedades de software era alto, y el resumen en [11] lo demuestra. En asignaturas de diseño de software, ya en este siglo, un trabajo como en [12] muestra cómo se pueden utilizar las PN para mejorar la representación de un sistema ya especificado con diagramas elaborados con Unified Modeling Language (UML).

En el campo de la ingeniería industrial, las redes de Petri han ocupado un lugar importante al permitir modelar y simular líneas de producción, cadenas de suministro, y hasta sistemas en la complejidad del ámbito de Industria 4.0. En muchos programas de ingeniería industrial de universidades extranjeras, las PN están como parte fundamental de las asignaturas sobre investigación de operaciones, toma de decisiones y simulación de sistemas.

En general, la adopción de PN en los programas del departamento de ingeniería industrial de la UNISON apuntaría hacia un alto grado de actualización académica en sus contenidos, a una internacionalización que permitiría a su cuerpo académico abordar temas de investigación de mayor novedad e interés en universidades extranjeras, y a ofrecer una ventaja competitiva a sus egresados al buscar colocarse en sectores industriales, como el automotriz.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eleazar Jiménez Serrano. Reporte de trabajo interno a Nidec Corp. sobre la cadena de suministro a nivel Tier-2 de motores eléctricos de la unidad de negocios automotrices de Nidec. Shiga, Japón. Noviembre 2019, "sin publicar".
- [2] Eleazar Jiménez Serrano. System and software verification using Petri nets. For functional safety of ISO-26262 requirements. Ed. New York, NY, USA: Amazon press, 2020.
- [3] Wolfgang Reisig. Understanding Petri nets. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. DOI 10.1007/978-3-642-33278-4.
- [4] W. Brauer, W. Reisig, G. Rozenberg. Petri nets: Central models and their properties. Ed. Springer-Verlag. 1987. DOI 10.1007/978-3-540-47919-2
- [5] Eleazar Jiménez Serrano. "Estimation of the size of state space of Petri nets to determine the size of hash tables," 12th WSEAS Int. Conf. on Applications of Computer Engineering, 2013, pp. 55-60.
- [6] N. Busi. Analysis issues in Petri nets with inhibitor arcs. Theoretical Computer Science No. 275, pp. 127-177, 2002.
- [7] Eleazar Jiménez Serrano. Multiple and simultaneous control using Controlled Dan Petri nets. Tesis de doctorado. Universidad de Kyushu. Marzo, 2008.
- [8] Louchka Popova-Zeugmann. Time and Petri Nets. Ed. Springer. 2013. DOI 10.1007/978-3-642-41115-1.
- [9] G. Balbo. Introduction to generalized stochastic Petri nets. Springer LNCS 4486, pp. 83-131, 2007.
- [10] H. Van Dyke Parunak, Robert Savit, Rick L. Riolo. "Agent-based modeling vs. equation-based modeling: a case study and users' guide," Proceedings of Multi-agent systems and Agent-based Simulation, 1998, pp. 10-25.
- [11] T. Murata. "Petri Nets: Properties, analysis and applications," Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No.4, April 1989, pp. 541-580.
- [12] B. Bordbar, L. Giacomini, D.J. Holding. "UML and Petri nets for design and analysis of distributed systems," Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, 2000, pp. 610-615.

Cómo citar este artículo:

Jimenez Serrano, E. (2022). Las redes de Petri y su adopción en programas de la UNISON. EPISTEMUS, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.221>

El desarrollo de la Astrobiología como ciencia

The development of astrobiology as a science

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Sebastián Alejandro Valencia Meza ¹
Anely Ortiz Alegría ²

Recibido: 08 / 11 / 2021

Aceptado: 04 / 11 / 2022

Publicado: 15 / 11 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.214>

Autor de Correspondencia:
Sebastián A. Valencia-Meza
Correo : a217208385@unison.mx

Resumen

La astrobiología es una ciencia que se encarga de estudiar el origen, la distribución y la evolución de la vida en el universo. Su origen es reciente y el camino para su desarrollo estuvo lleno de retos, sin embargo, en la actualidad es una de las ramas del conocimiento más importantes. El presente artículo abarca la historia de la astrobiología para su consolidación como ciencia, mencionando a algunos de los científicos exponentes en el tema, que realizaron los aportes más relevantes a esta disciplina.

Palabras clave: astrobiología, origen, historia.

Abstract

Astrobiology is a science that studies the origin, distribution and evolution of life in the universe. Its origin is recent and the path to its development was full of challenges, however, at present it is one of the most important disciplines. This article covers the history of astrobiology for its consolidation as a science, mentioning some of the scientific exponents in the field who made the most relevant contributions to this discipline.

Keywords: astrobiology, origin, history.

¹ Estudiante de licenciatura en Biología, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo electrónico: a217208385@unison.mx
² Estudiante de licenciatura en Biología, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, Correo Electrónico: a218201619@unison.mx



INTRODUCCIÓN

La Astrobiología es el estudio de la vida en el Universo. Su carácter multidisciplinario requiere de la interacción de la astrofísica, la geología y la biología, todas ellas en la búsqueda de vida extraterrestre a través de la exploración in situ, la espectroscopía de atmósferas planetarias solares y extrasolares. Además, hacen uso del modelaje con base en los organismos encontrados en la Tierra [1].

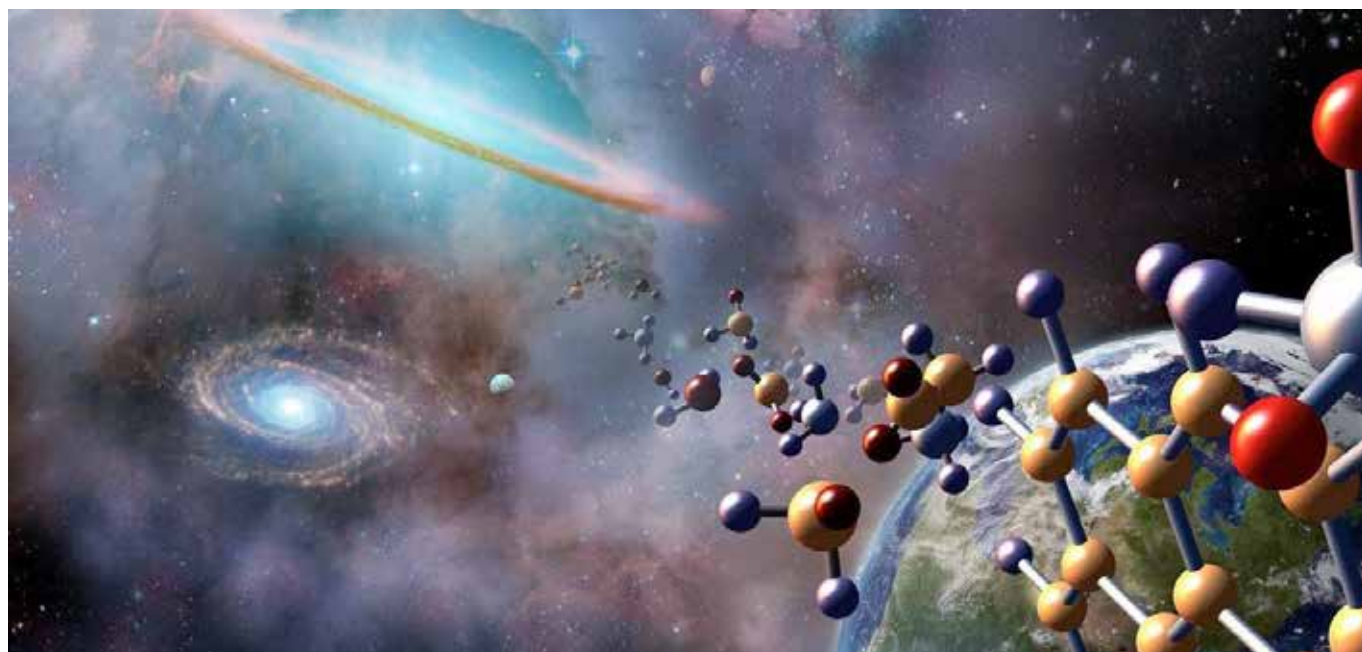
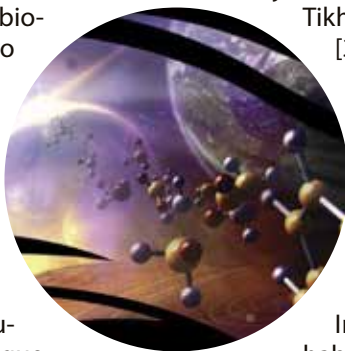
La Astrobiología busca responder preguntas tales como, ¿De qué manera se originó la vida en el planeta Tierra? y ¿Cuáles fueron las características que permitieron el desarrollo de la vida en este planeta?

Siendo preguntas tan vastas, las respuestas recaen en el trabajo colaborativo y en el desarrollo de nuevas tecnologías, apoyándose del trabajo tanto teórico como en laboratorio. Es por eso que en la astrobiología se necesita un espacio comunicativo para obtener la visión holística necesaria para responder las preguntas que se plantean. De esta manera en los grandes centros de investigación de astrobiología se trabaja con profesionales en distintas áreas de la ciencia y los enfoques de investigación son diversos. En el Centro de Astrobiología (CAB) localizado en Madrid, España se trabaja tanto en la simulación de posibles escenarios planetarios que puedan albergar vida, estudio de biomarcadores en sistemas extrasolares o exoplanetas, los distintos metabolismos hipotéticos que pueden presentar organismos vivos y la química prebiótica. Para desarrollar este tipo de estudios se requiere de la interacción de la bioquímica, la astronomía, la astrofísica, la biología molecular y la informática [2].

DESARROLLO

La historia de la astrobiología se inicia durante la segunda guerra mundial, cuando la ciencia incluía un desarrollo tecnológico vasto. Con el financiamiento de programas para la búsqueda de armas y desarrollo industrial, disciplinas novedosas comenzaron a cobrar el interés de gobiernos que antes tenían una visión sesgada hacia aspectos muy concretos. Esta necesidad por el desarrollo científico y tecnológico dejó grandes aportaciones, como un gran desarrollo en la ingeniería y la producción masiva de la penicilina. A su vez nos brindó nuevas disciplinas de la ciencia antes inexploradas, donde se encontraba la astrobiología.

La Astrobiología nace como disciplina científica en Kazajistán en 1941, bajo el liderazgo de Gavriil Adrianovich Tikhov, considerado el pionero de la Astrobotánica [3]. Astrónomos de Moscú y Leningrado, apoyados por el gobierno soviético habían viajado a Alma-Ata en Kazajistán para observar el eclipse solar total del 21 de septiembre. Al final de la guerra, no todos estos astrónomos habían abandonado Alma-Ata y bajo la iniciativa del académico V.G. Fessenkov, se llevaron a cabo planes para construir un observatorio astrofísico. Con el apoyo de K.I. Satpaev, se creó el Instituto de Astronomía y Física dentro de lo que había sido la Academia de Ciencias de la República Soviética Socialista de Kazajistán (ASKSSR). En 1950 se dividió en dos: el Instituto Físico-Técnico y el Instituto de Astrofísica, que ahora lleva el nombre de su fundador V.G. Fessenkov. Tikhov dedicó sus años en Alma-Ata a investigar la posible ocurrencia de la vida fuera de la Tierra. Lideró la organización del Sector de Astrobotánica. Su equipo de investigación estaba compuesto por astróno-



mos, físicos y biólogos que investigaron la fluorescencia de las plantas en el infrarrojo y otras características ópticas. Junto con la investigación de astrobotánica, algunos de los astrónomos y estudiantes de posgrado realizaron observaciones espectrofotométricas de la Luna, planetas, cometas, asteroides, así como estrellas magnéticas (estrellas de neutrones con un campo magnético muy fuerte). Su objetivo principal era estudiar las propiedades ópticas de las plantas en diversas condiciones climáticas, incluidas las que se pensaba que existían en Marte y Venus. La idea básica era la posibilidad de que las plantas se adaptaran a las condiciones climáticas severas cambiando su reflectividad espectral. La existencia de vegetación en Marte se consideró seriamente en este contexto histórico porque las observaciones durante varias décadas habían mostrado cambios estacionales, como variaciones en el tamaño de los casquetes polares o en la coloración de las áreas más oscuras llamadas “mares”, esto se atribuyó erróneamente a la presencia de plantas. Sin embargo, a diferencia de la vegetación terrestre, el espectro de los “mares” marcianos no mostró la absorción característica de la clorofila, es importante la consideración de la absorbancia de la clorofila ya que esta es un pigmento presente en plantas, algas y bacterias fotosintéticas. Este pigmento les permite captar la energía de la luz y convertir compuestos inorgánicos como el CO₂ en compuestos orgánicos como carbohidratos. Por lo que esto sirvió como un poderoso argumento para los opositores a la presencia de vida en Marte. Pero el estudio espectroscópico de plantas que crecen en climas fríos había demostrado que la banda de absorción de la clorofila se ensancha, es decir que el rango dentro del espectro de la luz que la clorofila tiende a absorber se ensancha alcanzando un mayor rango de absorbancia. Este hallazgo fue la base para la suposición de Tikhov de que, en condiciones de muy baja temperatura, la absorción de clorofila podría volverse tan amplia que pasaría desapercibida dentro de una región espectral estrecha [3]. Es importante recalcar



que no existen plantas en Marte, sin embargo, el razonamiento de Tikhov, fue bastante importante en su tiempo.

Para apoyar esta teoría, Tikhov y sus compañeros de trabajo realizaron una serie de expediciones en varias épocas del año a zonas de alta montaña, la tundra polar y regiones desérticas frías. Demostraron que las propiedades ópticas en realidad pueden modificarse bajo ciertas condiciones. A muy bajas temperaturas en particular, las plantas absorben energía solar no solo en el rango infrarrojo del espectro, sino también en el rango rojo e incluso amarillo-verde de la región visible. De esta manera se planteó erróneamente que las plantas en Marte absorben todas las frecuencias, pero reflejan solo los violetas y azules. Este razonamiento no es correcto, la superficie de Marte no cuenta con plantas, sin embargo, de su razonamiento y el estudio de la comprensión fisiológica de la vida en la Tierra para hacer inferencias de cómo se podría comportar la vida en otros sitios, parte hacia un pensamiento astrobiológico [4].

Con esto Tikhov estaba desarrollando técnicas que en la actualidad constituyen varias de las disciplinas actuales de la astrobiología y el desarrollo de modelos predictivos de vida en otros planetas tales como los modelos de habitabilidad, estos modelos se utilizan para determinar si un entorno es habitable o los factores claves que son responsables de la transición gradual de estados de habitabilidad bajos a altos (Méndez, 2021). Algunos de los modelajes que se generan actualmente consideran aspectos como los pigmentos, tomando en cuenta los procesos de fotosíntesis. Como la fotosíntesis en la Tierra fue un proceso que permitió el desarrollo de la vida en la Tierra que pueden detectarse astronómicamente a escala global, un foco fuerte de la búsqueda de vida extrasolar sería la fotosíntesis [5].

La astrobiología cobró relevancia y reconocimiento internacional a finales de la década de 1950, ya que en ese momento se encontraban dos grupos de científicos designados a la búsqueda de “vida extraterrestre” por el gobierno estadounidense. A estos grupos se les llamaban proyectos de Bioastronáutica, donde el enfoque era el de-





sarrollo de dispositivos de abordaje y la búsqueda de vida en Marte. El primer grupo de científicos constituyeron el Panel 2 sobre Vida Extraterrestre del Comité Nacional de Bioastronáutica, presidido por Melvin Calvin, especialista en bioquímica y descubridor del ciclo de Calvin. Además de contar con la participación de Carl Sagan, uno de los más respetados divulgadores de la ciencia. El segundo grupo formaba el Panel sobre Vida Extraterrestre de la Academia Nacional de Ciencias, el cual era encabezado por Joshua Lederberg, premio Nobel de Medicina en 1958, destacado biólogo y genetista, área en la que realizó descubrimientos de genética bacteriana junto con su esposa Esther Lederberg.

Lederberg publicó en 1960 un artículo donde, por primera vez, se acuñó el término de exobiología para referirse a la biología de origen extraterrestre [6]. Años después, el propio Lederberg hace una aproximación más actualizada a lo que es la astrobiología, mencionando que el objetivo principal de la investigación astrobiológica es la comparación de los diferentes modelos de evolución química planetaria, haciendo énfasis en sus características dominantes. Con ello hace énfasis en que la exobiología no se limita a la posible vida fuera de la Tierra, sino también a la comprensión de la vida terrestre para el modelaje de la posible vida extraterrestre [7]. Un ejemplo de organismo terrestre que puede soportar condiciones extremas, tales como las que se pueden presentar en el espacio, son los tardígrados (Figura 1). Estos animales, cuentan con procesos de criptobiosis que les permiten tolerar condiciones de alta salinidad, radiación, desecación, etc., permaneciendo en estado de latencia hasta que las condiciones vuelvan a ser ópti-

mas para cumplir su ciclo de vida, se han realizado estudios que indican a los tardígrados como un organismo modelo para la investigación astrobiológica, en 1964, se publicó un artículo titulado "Actions différentielles des rayons x et ultraviolets sur le tardigrade *Macrobiotus areolatus*", donde se planteó por primera vez a los tardígrados como posibles modelos para investigación especial debido a su resistencia a la radiación [8]. Con esto el interés en los tardígrados como modelo aumentó. Por lo que en 2007 Jönsson, publicó un estudio proponiendo que los tardígrados pueden ser organismos modelo adecuados para estudios astrobiológicos debido a su resistencia a la deshidratación, tolerancia a temperaturas extremas y a la radiación, para esto se comparó con otros animales anhidrobióticos (que pueden estabilizarse en un estado de latencia por falta de agua), como las artemias o los quironómidos y los tardígrados mostraron una mayor resistencia a la radiación [9]. En el mismo año, se realizaron tres proyectos espaciales durante la misión FOTON-M3. El proyecto Tardigrade Resistance to Space Effects (TARSE) fue el primero, donde su objetivo era analizar el impacto del estrés ambiental, los rasgos de la historia de vida y los daños en el ADN a bordo de la nave espacial en *Paramacrobiotus richtersi*. En este proyecto, tardígrados activos y anhidrobióticos fueron expuestos a radiación en condiciones de microgravedad [10]. El segundo proyecto fue TARDIS (Tardigrada In Space). Su principal objetivo fue comprobar si los tardígrados de dos especies, *Milnesium tardigradum* y *Richtersius coronifer*, eran capaces de sobrevivir en condiciones de espacio abierto. Demostrando que los tardígrados pueden sobrevivir a la exposición al vacío espacial, sin embargo, factores como la

radiación solar ultravioleta, radiación ionizante y radiación cósmica redujeron su tasa de sobrevivencia [11]. En el tercer proyecto RoTaRad (Rotifers, Tardigrades and Radiation), se examinaron los efectos sobre la supervivencia inicial, la supervivencia a largo plazo y la fecundidad de especies seleccionadas de tardígrados limnoterrestres así como de rotíferos en condiciones de estrés extremo (principalmente radiación) [12]. Estos estudios fueron relevantes en el área de la astrobiología ya que el proceso de criptobiosis permite una nueva visión ante como podría comportarse la vida en otros planetas, manteniéndose en latencia hasta que las condiciones sean óptimas [13]. Con estos estudios enunciados se puede mostrar cómo ha evolucionado la investigación en la astrobiología y como es la investigación actual, sin embargo, en la década de 1980 seguía existiendo escepticismo. Hasta que en 1996, tras el descubrimiento de ALH80001 un meteorito de origen marciano que generó gran controversia ya que se especulaba contaba con la presencia de vida bacteriana, la NASA financió la realización de programas ambiciosos en astrobiología, con lo cual la astrobiología se desarrolló como una ciencia independiente de gran importancia en la investigación espacial, y se acotó a su concepción actual donde es definida como el estudio de los orígenes, distribución, y evolución de la vida en el universo [14].

Es importante recalcar que al igual que la NASA jugó un papel fundamental en el desarrollo de la astrobiología en Estados Unidos, esta área tuvo su desarrollo a lo largo del mundo. El desarrollo de la astrobiología en Iberoamérica partió como Joan Oró, bioquímico español y ganador de la medalla Oparin por la Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida (ISSOL), sus aportaciones al área de la astrobiología ocurrieron durante la década de 1960 y fueron principalmente el descubrimiento de la síntesis de adenina a partir de ácido cianhídrico, la adenina es una de las cuatro bases del ADN con lo cual conocer su síntesis puede ser importante para hacer inferencias sobre donde se puede encontrar. Además de esto, Oró realizó investigaciones con la NASA, como el proyecto Apolo para análisis de las rocas y material de la Luna y en el proyecto Viking donde desarrolló experimentos para la busca de posibles microorganismos (los resultados no mostraron existencia de microorganismos en Marte) y el conocimiento de la superficie marciana. Y su aportación principal al área de la astrobiología fue el desarrollo de la Primera Escuela Iberoamericana de Astrobiología junto con Julián Chela Flores. En latinoamérica se resal-

tan las aportaciones de Carlos María Varsavsky, Fernando Raúl Colomb y Guillermo Lemarchand, para el desarrollo de la astrobiología en argentina. Varsavsky en 1968 publica el primer libro de un científico latinoamericano sobre búsqueda de vida inteligente en el universo además de dirigir el IAR (Instituto Argentino de Radioastronomía), Colomb participó como asistente de investigación de Frank Drake para la búsqueda de señales vida inteligente en el NRAO (National Radio Astronomy Observatory), además de actuar como director del IAR (Instituto Argentino de Radioastronomía) y participar como divulgador en el área de astrobiología en latinoamérica [15]. Guillermo Lemarchand fue director del programa SETI META II financiado por The Planetary Society en Instituto de radioastronomía de Argentina donde se buscan señales de vida inteligente en el universo, además de ser divulgador en el área y de publicar un libro de divulgación donde además documen-

ta el desarrollo de la astrobiología en latinoamérica "Astrobiología: del Big Bang a las civilizaciones" [16]. En México el desarrollo de la astrobiología ha sido basto, con grandes exponentes como Rafael Navarro investigador mexicano que colaboró con la NASA en el Sample Analysis at Mars, con su trabajo, contribuyó a la identificación de compuestos orgánicos en el planeta rojo. También fue invitado a participar en el instrumento HABIT (Habitability, Brine Irradiation and Temperature) de la misión ExoMars

de la Agencia Espacial Europea, un experimento diseñado para recolectar agua de la atmósfera de Marte. Otro gran exponente es Antonio Lazcano, biólogo evolutivo y representante en el área del origen de la vida, fue discípulo de Oparin y trabajó con Stanley Miller. Su trabajo impulsó la investigación sobre la temática del origen de la vida y la química prebiótica, además de participar como Presidente de la Sociedad Internacional sobre Estudios del Origen de la Vida (ISSOL) [15]. Una asociación mexicana representativa del área de astrobiología es el SOMA, es una sociedad civil que surgió en 1998 bajo los cimientos de la Sociedad Mexicana de Ciencias de la Vida en el Espacio, los objetivos de SOMA son estudiar las ciencias interdisciplinarias relacionadas con la vida en la Tierra, así como otros cuerpos planetarios; establecer colaboraciones entre organismos nacionales e internacionales; crear cursos en disciplinas relacionadas con la astrobiología, y difundir la importancia de la astrobiología al público (particularmente a la juventud). SOMA se unió al Instituto de Astrobiología de la NASA (NAI) como miembro afiliado en 2012 [17].



CONCLUSIÓN

La astrobiología enfrentó retos en su desarrollo, pero ha logrado consolidarse como una novedosa rama en la investigación científica. Tratando de responder a preguntas importantes que la humanidad se ha planteado desde sus inicios, como lo serían las limitaciones que tiene la vida misma, o cómo se desarrollarían los organismos en ambientes interplanetarios que no presentan las condiciones a las que nosotros nos hemos habituado. En la actualidad esta área de la ciencia se ha planteado objetivos para un mayor progreso, consolidando en 2015 una estrategia para el desarrollo de la astrobiología por parte de la NASA [18]. Donde se establecieron objetivos de investigación financiados por la propia NASA. Recientemente en 2020 el Programa de Astrobiología de la NASA anunció la selección de ocho nuevos equipos de investigación interdisciplinarios, inaugurando el programa de Consorcios Interdisciplinarios para la Investigación de Astrobiología (ICAR). Estos equipos abarcan el espectro de la investigación en astrobiología, desde los orígenes cósmicos hasta la formación del sistema planetario, los orígenes y evolución de la vida y la búsqueda de vida más allá de la Tierra. México, por su lado, no se ha quedado atrás en investigaciones astrobiológicas. Gracias al SOMA se pueden estudiar y difundir más sobre esta ciencia. Así mismo, otro modelo (pues hay varios, no existen únicamente los tardígrados) del que se pueden partir inferencias astrobiológicas, engloba a los organismos extremófilos, quienes no sólo soportan condiciones atmosféricas radicales, sino que también habitan en las mismas. Haciendo de las aguas termales, o formaciones acuosas ácidas, un dulce y cómodo hogar. Es así como la astrobiología ha logrado ser formalizada como un área de importancia actual además de contar con el financiamiento y la formación de programas con un enfoque para su desarrollo.



Figura 1. Animación de un Tardigrado (*Mylnesium* sp.) Elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C.F. Chyba & K.P. Hand, 2005. Astrobiology: The Study of the Living Universe. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 43(1), pp. 31-74. DOI:10.1146/annurev.astro.43-051804.102202

- [2] Luque, B., Ballesteros, F., Márquez, M., Agea, A., & Lara, L. (2009). *Astrobiología: Un puente entre el Big Bang y la vida*. Ediciones Akal.
- [3] V. Tejfel, 2009. Gavriil Adrianovich Tikhov (1875-1960) a pioneer in astrobiology. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 5(H15), pp. 720-721
- [4] V. Bazykine, 1960. The new science of astrobotany. *South African Journal of Science*, 56(19), pp. 229-231
- [5] N.Y. Kiang, A. Segura, G. Tinetti, R.E. Blankenship, M. Cohen, J. Siefert, ... & V.S. Meadows, 2007. Spectral signatures of photosynthesis II. Coevolution with other stars and the atmosphere of extrasolar worlds. *Astrobiology*, 7(1), pp. 252-274
- [6] J. Lederberg, 1960. Exobiology: approaches to life beyond the Earth. *Science* 132(3424), pp. 393-400
- [7] G.A. Lemarchand & G. Tancredi, 2010. Una breve historia social de la astrobiología en Iberoamérica. *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería* 1, pp. 23-52
- [8] RM, May, 1964. Action différentielle des rayons x et ultraviolets sur le tardigrade *Macrobiotus areolatus*, a léétat actif et desséché. *Toto. Biol. Francia Bélgica*, 98, 349-367
- [9] Jonsson, KI, 2007. Los tardígrados como organismo modelo potencial en la investigación espacial. *Astrobiología*, 7(5), 757-766
- [10] Altiero, T., Guidetti, R., Caselli, V., Cesari, M., Rebecchi, L., 2011. Tolerancia a la radiación ultravioleta en eutardígrados hidratados y desecados. *Revista de Sistemática Zoológica e Investigación Evolutiva*, 49, 90-97
- [11] KI, Jonsson, E, Rabbow, RO, Schill, M, Harms-Ringdahl, P, Rettberg, 2008. Los tardígrados sobreviven a la exposición al espacio en órbita terrestre baja. *Biología actual*, 18(17), R729-R731
- [12] D. Persson, KA, Halberg, A, Jorgensen, C Ricci, N Mobjerg, RM Kristensen, 2011. Tolerancia al estrés extremo en tardígrados: condiciones espaciales sobrevivientes en órbita terrestre baja. *Revista de Sistemática Zoológica e Investigación Evolutiva* 49, 90-97
- [13] E. Weronika, & K Lukasz, 2017. Tardigrades in space research-past and future. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 47(4), 545-553
- [14] S.I. Ramírez & H. Terrazas, 2006. Astrobiología, una nueva disciplina científica. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos* (3), pp. 45-54
- [15] G.A. Lemarchand & G Tancredi (Eds), 2010. *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones*. UNESCO
- [16] XC. Abrevaya, 2020. Breve historia de la astrobiología en Argentina. *arXiv preprint arXiv:2010.13883*
- [17] K. Cervantes de la Cruz, G. Cordero-Tercero, Y, Gómez Maqueo Chew, I. Lozada-Chávez, L. Montoya, SI Ramírez-Jiménez, A. Segura. 2020. Astrobiology and Planetary Sciences in Mexico. In *Astrobiology and Cuatro Ciénegas Basin as an Analog of Early Earth* (pp. 31-74). Springer, Cham.
- [18] Hays, L., Achenbach, L., Bailey, J., Barnes, R. K., Baroaa, J. A., Bertka, C., & Worsworth, R. D. (2015). *NASA Astrobiology Strategy 2015*. Retrieved from the NAI website https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2015/10/NASA_Astrobiology_Strategy_2015_151008.

Cómo citar este artículo:

Valencia Meza, A., & Ortiz Alegría, A. (2022). El desarrollo de la Astrobiología como ciencia: *Astrobiología. EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.225>

Modelo computacional de la formación de cúmulos proto-estelares: aplicación a “the Brick”.

Formation of protostellar clusters' computational model: an application to 'the Brick'.

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Guillermo Arreaga García ¹

Recibido: 17 / 05 / 2022

Aceptado: 20 / 10 / 2022

Publicado: 24 / 11 / 2022

DOL: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.225>

Autor de Correspondencia:
Guillermo Arreaga García
Correo : guillermo.arreaga@unison.mx

Resumen

En el presente trabajo se exponen los resultados de un proyecto de simulación numérica diseñado para estudiar el proceso de formación de la nube interestelar conocida como "the Brick". Dicha nube está localizada cerca del centro de la Vía Láctea. El proceso de formación simulado está basado en la colisión de dos sub-nubes de gas que están contenidas en una nube progenitora mayor. Una característica fundamental es que el gas que simulamos muestra velocidades turbulentas. Estudiamos los resultados de varias simulaciones que representan bien algunos casos de interés académico, además del caso de la nube "the Brick". Adicionalmente, calculamos las propiedades físicas de los grupos de proto-estrellas resultantes de tales modelos. Por la masa obtenida, dichos grupos se pueden identificar como cúmulos proto-estelares.

Palabras clave: astrofísica, simulaciones, gas, proto-estrellas.

Abstract

In the present work, we show results of a numerical simulation project aimed to study the formation process of the interstellar cloud known as "the Brick". This cloud is located near the Milky Way center. The simulated formation process is based on the collision of two gas sub-clouds that are contained within a larger progenitor cloud. A fundamental characteristic is that the simulated gas shows turbulent velocities. The results of several simulations that well represent some cases of academic interest are studied besides the case of the cloud "the Brick". In addition, we calculate the physical properties of the groups of proto- star resulting from such models. Due to the obtained mass, these groups can be identified as protostellar clusters.

Keywords: astrophysics, simulations, gas, protostars.

¹ Doctor en Ciencias, Departamento de Investigación en Física. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, guillermo.arreaga@unison.mx, orcid:0000-0003-3873-3894.



INTRODUCCIÓN

En una noche oscura es posible apreciar a simple vista el cielo con un número enorme de estrellas e incluso con buena suerte, se puede ver la franja brillante que inspiró a los griegos a llamarla Vía Láctea, ver Figura 1.



Figura 1. Noche estrellada. Imagen tomada por el astrónomo Julio Saucedo (DIFUS-UNISON).

Con ayuda de un telescopio se puede notar que las estrellas forman grupos, que pueden contener desde un número pequeño de miembros, hasta agrupaciones que contienen miles de miembros. En este último caso, los grupos reciben el nombre de cúmulos estelares. Las estrellas pertenecientes a un grupo son muy similares con respecto a sus propiedades físicas. En particular, todas las estrellas miembros de un grupo están relacionadas dinámicamente, pues se formaron en un período de tiempo muy corto en comparación con el tiempo de evolución de las estrellas.

Estudiar el proceso de formación de las estrellas y en

particular la formación de los cúmulos de estrellas es muy interesante por los variados fenómenos físicos que están involucrados [1]. El proceso de formación se inicia con enormes nubes de gas de hidrógeno molecular; dichas nubes se encuentran localizadas tanto en el disco de la galaxia como en el bulbo central. Consideremos una nube con densidad uniforme. La fuerza neta sobre un elemento de fluido debido a la atracción gravitacional de la nube sería básicamente cero.

La presencia de partículas de polvo e interacciones con otras nubes actúan como perturbaciones de densidad o semillas de acumulación de masa; ya que un elemento de fluido con un contenido de materia ligeramente mayor que los elementos vecinos, los atrae gravitacionalmente. Y una vez que se presenta este fenómeno aleatorio de generación de una perturbación inicial, el proceso de acumulación de masa ya no puede detenerse debido a la naturaleza atractiva de la fuerza de gravedad. Por esta razón, a este suceso se le llama inestabilidad gravitacional. Al movimiento de la masa circundante hacia un núcleo más masivo debido a la atracción gravitacional, se le conoce como acreción y es la base física del colapso gravitacional [2].

La ocurrencia del colapso gravitacional hace que las nubes disminuyan su tamaño y aumenten su densidad, hasta que se forman estructuras proto-estelares cuya densidad ha aumentado en más de 10 órdenes de magnitud con respecto a la concentración inicial y su tamaño ha disminuido hasta el 10 por ciento del tamaño inicial de la misma. El fenómeno que hemos descrito en el párrafo anterior ocurre en múltiples sitios de la nube de manera simultánea, por lo tanto, en esta etapa del proceso de colapso, se forman múltiples sistemas proto-estelares.

Aunque las proto-estrellas todavía no brillan como una estrella real, sí comparten la mayoría de las propiedades dinámicas, como movimientos de rotación, traslación y en el caso de sistemas binarios, el movimiento orbital. Estas



propiedades de las proto-estrellas muy probablemente serán heredadas a sus descendientes que sí logren convertirse en estrellas, de seguir su curso de colapso gravitacional más allá de la etapa proto-estelar.

La formación de protoestrellas es un fenómeno complejo, por lo cual es necesario realizar simulaciones numéricas. Con el código Gadget2, podemos simular el proceso de colapso gravitacional desde una nube inicial hasta la etapa de proto-estrellas [3]. Sin embargo, debido al cambio tan significativo tanto en densidad como en radio durante el proceso de colapso de una nube, se requiere de super-cómputo para hacer el seguimiento de manera suficientemente aceptable.

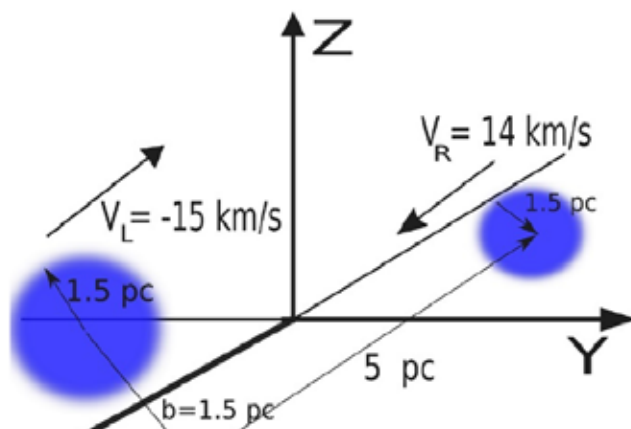


Figura 2. Se destacan las dos sub-nubes que van a colisionar. La nube progenitora que contiene a ambas sub-nubes no se muestra explícitamente.

DESARROLLO

El modelo está basado en la colisión de dos sub-nubes de gas, que están contenidas en una nube progenitora mayor, ver Figura 2. La nube mayor es turbulenta y, por lo tanto, también lo son las dos sub-nubes. En la Figura 2 no se ve explícitamente la nube mayor, con el propósito de enfatizar la presencia de las sub-nubes en color azul. La nube mayor tiene un radio de 5 parsecs (un parsec es equivalente a la distancia que viaja la luz durante 3.26 años a una velocidad de 300 000 km por segundo) está centrada en el origen de coordenadas, por lo cual contiene a ambas sub-nubes. Nos interesa simular numéricamente la colisión de las sub-nubes y la evolución dinámica de todo el sistema.

El primer paso es generar un modelo computacional de una nube turbulenta de gas de hidrógeno molecular, con las propiedades físicas adecuadas para representar a una nube progenitora en la región central de la Vía Láctea, que pueda dar origen a la nube más densa conocida como The Brick. Estas consideraciones fijan la masa total y el tamaño de la nube progenitora inicial.

En este punto es importante establecer que la evolución dinámica de los sistemas por simular la hacemos con

el código Gadget2; el cual integra las ecuaciones hidrodinámicas de un fluido auto-gravitante, usando la técnica de partículas suavizadas, que se abrevia en inglés como SPH [3].

El conjunto de partículas SPH está listo para ser evolucionado una vez que a cada partícula se le asignen posición y velocidad iniciales. La posición inicial se escoge de tal forma que la esfera tenga un perfil radial de densidad constante para todo radio. Para calcular la velocidad inicial de cada partícula, se debe crear un espacio de Fourier, en el cual cada componente de velocidad cartesiana se expresa como una sumatoria de un número fijo de modos de Fourier [4].

La determinación de las velocidades iniciales suele requerir mucho tiempo de cálculo, por lo cual este paso es computacionalmente más complicado. No obstante, se puede resolver este problema mediante la paralelización del código de generación de las velocidades, de tal forma que el número total de partículas SPH sea dividida entre el número de procesadores disponibles para el cálculo, de tal forma que a cada procesador le toquen un número manejable de partículas.

Una nube turbulenta muestra una dinámica de evolución muy particular durante el colapso gravitacional. Inicialmente, todas las partículas SPH adquieren velocidades de muy diferente magnitud y en direcciones aleatorias. Por esta razón, se forman múltiples semillas de masa de manera natural. Como mencionamos antes, con estas semillas de masa se inicia el proceso de colapso gravitacional de la nube, en múltiples lugares simultáneamente, ver el panel izquierdo de la Figura 3.

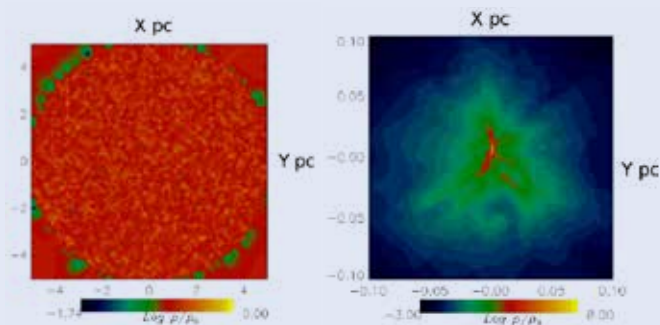


Figura 3. Visualización gráfica de la dinámica turbulenta.

Mostramos cortes bi-dimensionales de una esfera, que son paralelos al ecuador. La longitud de los ejes está en parsecs. En el panel izquierdo mostramos una nube en sus primeros estados de evolución. En el panel derecho mostramos la misma nube cuando ya está en sus últimos estados de evolución, en el cual ésta ha colapsado, como se puede apreciar al comparar en cada panel, las dimensiones en los ejes y el nivel de densidad mostrado en la barra horizontal.

La evolución temporal de la nube turbulenta, mediante la integración de las ecuaciones hidrodinámicas acopladas



con la fuerza de gravedad, muestran que la parte central de la misma colapsa hacia el centro de la esfera, mediante varios filamentos asimétricos. Ver el panel derecho de la Figura 3. El segundo paso es escoger dos sub-nubes, que estén contenidas completamente en la nube original. Debemos escoger aquellas partículas SPH localizadas alrededor de un centro, el cual ha sido fijado de antemano. Sólo aquellas partículas cuya distancia al centro sea menor que un radio dado (definido apropiadamente de antemano) serán consideradas parte de la sub-nube. Como se puede apreciar en la Figura 2, etiquetamos las sub-nubes como L (left) y R (right), de acuerdo con su posición inicial en el eje X.

Con el propósito de lograr que las sub-nubes se muevan una hacia la otra para chocar es necesario agregar una velocidad traslacional a la velocidad turbulenta de las partículas SPH de cada una de ellas. Cabe aclarar que, sin esta velocidad traslacional, las sub-nubes no colisionarían, pues como mostramos en la Figura 3, una nube turbulenta terminaría con un colapso anisotrópico central. Por otro lado, existe amplia evidencia observacional de la ocurrencia de colisiones entre nubes moleculares [5]. Una posible explicación de la ocurrencia de colisiones entre nubes- que se mueven principalmente siguiendo la rotación de la Galaxia- es que se han observado nubes que también se mueven en direcciones aleatorias en el plano de la Galaxia [6] y [7]. Estos movimientos aleatorios podrían ser causados por perturbaciones de origen dinámico, como explosiones de supernovas.

El radio, la velocidad de traslación pre-colisión y la separación inicial de las sub-nubes se escogen desiguales y las consideramos como parámetros del modelo, esto es, sus valores pueden cambiar en cada simulación, con el propósito de estudiar su influencia en la evolución del proceso. Todas las simulaciones están calibradas para tener la misma masa total y las mismas razones de energía inicial,

las cuales son dos cantidades relevantes para caracterizar el estado dinámico del gas en la nube. Se definen de la siguiente manera: una es el cociente de la energía térmica a la energía gravitacional y la otra es el cociente de la energía cinética a la energía gravitacional. Estos valores iniciales determinan en buena medida la evolución posterior del sistema y, por consiguiente, los resultados del colapso son básicamente diferentes para sistemas con otros valores de los cocientes de energía.

De hecho, en la investigación que hemos realizado de este tema, hemos definido varios modelos, en los cuales se pueden cambiar (i) el cociente inicial de los radios de las sub-nubes; (ii) los valores de los cocientes iniciales de energías tanto térmica como cinética con respecto a la energía gravitacional y (iii) el uso de un parámetro de impacto, que se define como una distancia de separación entre las trayectorias de las sub-nubes, de tal forma que la colisión frontal entre las sub-nubes, corresponde a un parámetro de impacto igual a cero. Cuando este parámetro de impacto no es cero, entonces la colisión de las sub-nubes tiene lugar de manera oblicua.

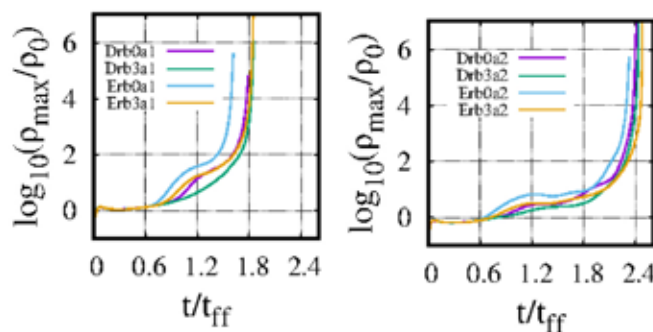


Figura 4. Ejemplos de curvas típicas de evolución de la densidad máxima de varias simulaciones.

El tercer paso consiste en realizar la evolución dinámica de todos los modelos, hasta el mayor tiempo posible. De hecho, la evolución dinámica del sistema no puede ser arbitrariamente larga, pues en la medida en que aumenta la densidad del gas debido al colapso gravitacional, el paso de tiempo de la integración numérica se hace cada vez más pequeño, ya que depende inversamente con la densidad. En la Figura 4, mostramos ejemplos típicos de las curvas de evolución de la densidad máxima en cada modelo de simulación con respecto al tiempo de evolución, que se mide en términos del tiempo de caída libre, que en este modelo es de 0.27 millones de años y se representa con el símbolo t_{ff} . Este tiempo de caída libre se define como el tiempo que una partícula de prueba localizada en el exterior de la nube necesitaría para alcanzar el centro de esta cuando solo actúa la fuerza de atracción gravitacional. El tiempo de caída libre se interpreta como la escala de tiempo necesario para que una nube colapse. Una vez que se alcanza la mayor evolución dinámica posible con el código Gadget2, finalmente se obtienen los resultados del modelo. Para mostrar estos resultados usamos gráficas de densidad en planos paralelos al ecuador de la esfera, similares a los que mostramos en la Figura 3 y ejemplos de estos resultados se muestran en la Figura 5.

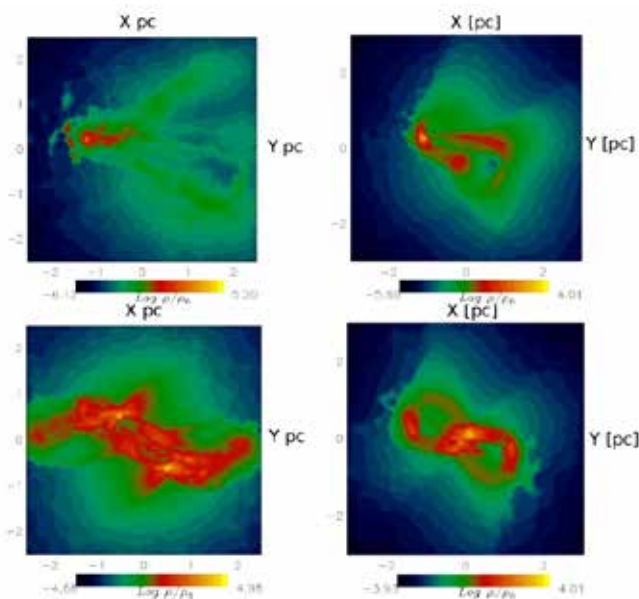


Figura 5. Representación visual de las configuraciones finales de los modelos.

La Figura 5 muestra los resultados de un par de modelos de colisión, en los que se ha incluido un parámetro de impacto igual en los dos modelos y solo la razón de radios iniciales de la sub-nubes escogidas es diferente, a saber: en los paneles de arriba, tenemos un radio de 0.75 pc para la sub-nube izquierda y 1.5 pc para la sub-nube derecha. Mientras, para los paneles de abajo, los radios iniciales de las sub-nubes son iguales.



La Figura 5 se refiere a modelos de simulación en los que hay un parámetro de impacto no cero, por lo cual la colisión es oblicua. Podemos observar que la sub-nube de la izquierda se mueve hacia la derecha, mientras que la sub-nube de la derecha se mueve hacia la izquierda. En la región central de cada panel, ocurre la colisión de las sub-nubes.

Se debe notar que los radios iniciales de las sub-nubes son diferentes en los paneles de arriba e iguales para los paneles de abajo. El valor del cociente de la energía térmica es menor para los paneles de la columna izquierda con respecto al valor mayor de los paneles de la columna derecha. Queremos resaltar que el valor de los parámetros si determina una diferencia significativa en los resultados de la simulación.

En la parte inferior de cada panel de la Figura 5, una barra establece una relación entre color y densidad alcanzada en la simulación. Tal como indican las barras, la región coloreada de amarillo indica regiones con mayor densidad. Según los términos introducidos en párrafos anteriores, estas regiones amarillas indican a las posibles regiones proto-estelares.

El último paso es caracterizar a esas regiones identificadas como proto-estelares y comparar contra observaciones. Con respecto a la caracterización, mencionamos que los parámetros físicos más importantes son la masa, el tamaño, la morfología y la razón de las energías tanto térmica como cinética con respecto a la energía gravitacional. A manera de ejemplo, en la figura 6 mostramos el valor de la masa para dos series de simulaciones. Encontramos que esas regiones contienen una masa cien mil veces la masa del sol. Por esta razón, consideramos que estamos simulando la formación de un cúmulo proto-estelar.

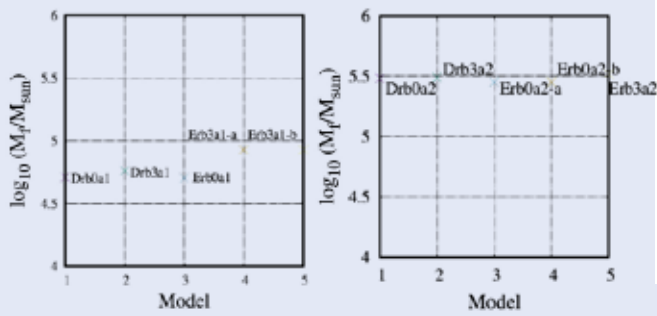


Figura 6. La masa de las regiones proto-estelares identificadas en dos series de modelos.

Ahora bien, con respecto a la comparación con observaciones, la comparación visual entre las estructuras observada y computacional es obviamente el primer elemento. De los modelos considerados, únicamente el mostrado en el panel inferior izquierdo de la Figura 5 se parece a la imagen de la nube conocida como the Brick [8], la cual se



reproduce aquí en la Figura 7. Se observa una estructura alargada con múltiples protuberancias. Un segundo elemento de comparación sería entre la masa y el tamaño de la estructura. En la Tabla 1 se muestran estos datos.

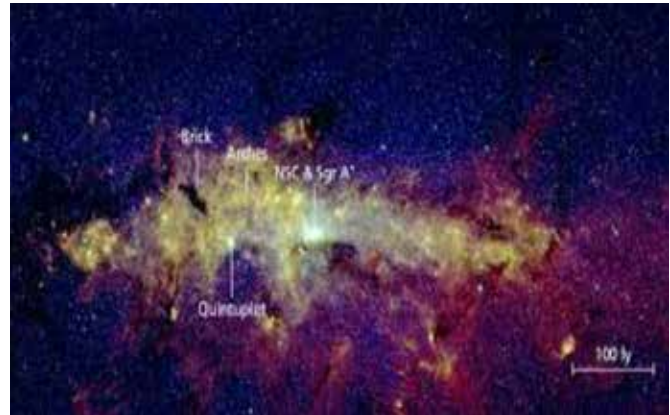


Figura 7. Imagen de la región central de la vía láctea.

En la Figura 7, se puede observar (en la región centro-izquierda de arriba) la etiqueta de la nube molecular conocida como "the Brick". En el recuadro de la esquina derecha-abajo, se ve la escala de longitud de la gráfica en años-luz. Un año-luz (ly en inglés) es una distancia equivalente a 0.3 parsecs.

Tabla 1. Comparación entre los parámetros físicos observados en la nube The Brick y los obtenidos en la simulación computacional.

	The Brick	Simulación
Masa [masas solares]	10^5	$10^{4.5}-10^{5.5}$
Longitud (radio promedio) [parsecs]	3	4





CONCLUSIONES

Es importante señalar que la dinámica de fluidos en nubes interestelares es un área de mucho interés para astrofísicos tanto teóricos como simuladores computacionales [9]. En particular, la turbulencia en fluidos astrofísicos ha sido estudiada con mucho interés desde hace varios años [10]. Y continuará siendo un tema de atención en el futuro, pues aún existen muchos problemas no resueltos, en los cuales la simulación computacional es una herramienta ideal para explorar [11] y [12].

Hoy día, la representación computacional apoya fuertemente a la investigación en astrofísica y cosmología mediante la realización de experimentos numéricos. La utilidad de dichos experimentos depende de la capacidad del modelo de capturar elementos físicos relevantes en el proceso real. Por esta razón, siempre se deben aplicar pruebas de consistencia y robustez de las simulaciones. En el caso de las que hemos mencionado en este artículo, se llevó a cabo un análisis de la resolución.

La resolución de una simulación depende básicamente del número de partículas SPH que participan. Cuando este número es suficientemente alto, se logra la consistencia en la resolución de dicha reproducción, entonces se garantiza que los resultados reportados son confiables. Con respecto a las que se presentan en este trabajo, se trata de 15 millones de partículas. Para manipular este número de partículas, es indispensable contar con acceso a un sistema de super-cómputo.

Ahora bien, la exploración de modelos de formación para nubes moleculares y su posterior evolución para formar estructuras proto-estelares es un área de investigación activa desde hace mucho tiempo.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece al Laboratorio Nacional de Super-cómputo del Sureste de México (LNS), perteneciente al padrón de laboratorios nacionales CONACYT, por los recursos computacionales, el apoyo y la asistencia técnica brindados, a través del proyecto Número 201801006n.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. H. Bodenheimer, Principles of star formation, Springer-Verlag, 2011.
- [2] A. Rimmer, "The very hungry Universe", Astronomy, June 2022. <https://astronomy.com/issues/2022/june-2022>.
- [3] V. Springel, "The cosmological simulation code GADGET-2", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 364, pp.1105, 2005.
- [4] G. Arreaga-García, "The effects on a core collapse of the changes in the number and size of turbulent modes of velocity", Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, Vol. 53, Num.2, pp.361-384, 2017.
- [5] R.I. Yamada, Y. Fukui, H. Sano, K. Tachihara, J.H. Bieging, R. Enokiya, A. Nishimura, S. Fujita, M. Kohno y K. Tsuge, arXiv:2106.01852, 2021.
- [6] E. Roslowsky, G. Engargiola, R. Plambeck and L. Blitz, "Giant molecular clouds in M33. High resolution observations", The Astrophysical Journal, vol. 599, pp.258-274, 2003.
- [7] A. Bolatto, A. Leroy, E. Roslowsky, F. Walter and L. Blitz, "The resolved properties of extragalactic giant molecular clouds", The Astrophysical Journal, vol. 686, pp.948-965, 2008.
- [8] Longmore, S.N., Rathborne, J., Bastian, N., Alves, J., Ascenso, J., Bally, J., Testi, L., Longmore, A., Battersby, C., Bressert, E., Purcell, C., Walsh, A., Jackson, J., Foster, J., Molinari, S., Meingast, S., Amorim, A., Lima, J., Marques, R., Moitinho, A., Pinhao, J., J. Rebordao, J. and Santos, F.D., "G0.253+0.016: a molecular cloud progenitor of an Arches-like cluster", The Astrophysical Journal, vol. 746, pp.117-127, 2012.
- [9] C.J. Clarke y R.F. Carswell, Principles of astrophysical fluids dynamics, Cambridge, 2009.
- [10] C. Federrath, "The turbulent formation of stars", Physics Today, vol. 71, Num. 6, pp.38-42, 2018.
- [11] M. R. Krumholz, "New theory of star formation", Astronomy, February 2008, <https://astronomy.com/news/2008/02/new-theory-of-star-formation>
- [12] D. Utomo, L. Blitz y E. Falgarone, "The origin of interstellar turbulence in M33", The Astrophysical Journal, 87117, 2019.

Cómo citar este artículo:

Arreaga García, G. (2022). Modelo computacional de la formación de cúmulos proto-estelares: aplicación a "the Brick". EPISTEMUS, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.225>

Aplicaciones tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria

Technological applications of nanoparticles in medicine and Industry

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

R. Britto Hurtado¹⁻⁴
M. Cortez-Valadez²
M. Flores-Acosta³

Recibido: 15 / 02 / 2022

Aceptado: 30 / 05 / 2022

Publicado: 08 / 06 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.223>

Autor de Correspondencia:

R. Britto Hurtado

Correo: ricardoabritto@gmail.com;

ricardo.britto@unison.mx

Resumen

Los avances tecnológicos en la ciencia de los materiales han impactado en diferentes áreas del conocimiento como la medicina, los alimentos, los cosméticos, dispositivos electrónicos, entre otros, con el propósito de aprovechar las propiedades de las nanopartículas y resolver problemáticas actuales en beneficio de la sociedad. En esta revisión se presenta una descripción general y actualizada de las aplicaciones de las nanopartículas en diferentes áreas del conocimiento. Se muestra la importancia de los avances nanotecnológicos actuales para combatir diferentes bacterias patógenas, el virus SARS-CoV-2 y tratamientos de enfermedades cancerígenas con nanopartículas. Por otra parte, se discute brevemente la importancia de las nanopartículas en la industria textil, automotriz y agroindustria como alternativa para obtener telas inteligentes, mejoramiento de estética en carros, durabilidad de partes y disminución de contaminantes por CO₂, así como en la producción de alimentos seguros, de alta calidad y sostenibles.

Palabras clave: nanopartículas, Avances Nanotecnológicos, Nanomateriales.

Abstract

Technological advances in materials science have impacted different areas of knowledge such as medicine, food production, cosmetics, electronic devices, among others, to take advantage of the properties of nanoparticles and solve current problems for the benefit of society. Therefore, this review presents a general and updated description of the applications of nanoparticles in different areas of knowledge. The importance of current nanotechnological advances to combat different pathogenic bacteria, the SARS-CoV-2 virus, and treatments of cancer diseases with nanoparticles is presented. On the other hand, the importance of nanoparticles in the textile, automotive, and agribusiness industries is discussed as an alternative to obtaining intelligent cloth, improvement of car aesthetics, the durability of parts, and reduction of CO₂ pollutants, as well as in the production of safe, high quality and sustainable food.

Keywords: nanoparticles, Nanotechnological Advances, Nanomaterials.

¹ PhD, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, ricardoabritto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7658-1970>

² PhD, CONACyt-Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, manuelcortez@live.com, <https://orcid.org/0000-0003-1323-2743>

³ PhD, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, mflores@difus.uson.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1708-0169>

⁴ PhD, Universidad Estatal Sonora, Hermosillo, Sonora, México, ricardoabritto@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7658-1970>



INTRODUCCIÓN

Las propiedades fisicoquímicas de los materiales de escala nanométrica ($1\text{ nm} = 0.000000001\text{ m}$) son relevantes para aplicaciones nanotecnológicas actuales en diferentes áreas del conocimiento. Desde tiempos antiguos y hasta la actualidad, las nanopartículas (NPs) han estado presente en las actividades humanas. Algunas civilizaciones antiguas utilizaban coloides de oro de manera empírica para darle color a los cristales y las cerámicas. Por ejemplo, una de las muestras más antiguas en la utilización de nanopartículas, consiste en un marfil egipcio chapado en oro que data del siglo VIII a. C., en el que, las nanopartículas de oro formaron una mancha púrpura por la difusión de oro de una lámina delgada, soportada en el sustrato de marfil poroso. Otro ejemplo, es una copa de vidrio denominada "La copa de Licurgo" que se encuentra en el Museo Británico y fue fabricada por los romanos en el siglo IV, se caracteriza por presentar un efecto óptico interesante en función de la iluminación, refleja la luz verde y transmite la luz roja [1]. Después de un análisis químico realizado en 1976 por Lee y colaboradores, determinaron que contenía nanopartículas metálicas de oro y plata con tamaños entre 50 a 70 nm [2]. Actualmente las nanopartículas se usan desde una pintura que repele el polvo y la suciedad, hasta el tratamiento de enfermedades cancerígenas. Por ejemplo, se ha reportado el uso de nanopartículas en cosméticos para aumentar la estabilidad de los productos [3]. Así mismo, las nanopartículas son incorporadas en cremas solares u otras cremas, con el propósito de crear barreras protectoras contra rayos UV, mejor adsorción y penetración en la piel [4]. Recientemente, se reportó la incorporación de nanopartículas de plata en un esmalte para uñas por su actividad antifúngica para el tratamiento de infecciones onicomicóticas [5]. Por otra parte, las pinturas con nanopartículas están siendo utilizadas y comercializadas ampliamente. La adición de las nanopartículas en las pinturas mejora las propiedades de éstas, haciéndolas resistentes a rayaduras, repelentes del agua, antibacteriales, antivirales y duraderas. Investigadores han reportado pinturas con nanopartículas de plata con propiedades antimicrobianas y antifúngicas [6]. Los avances en la utilización de los nanomateriales en medi-

cina son prominentes para el tratamiento de enfermedades cancerígenas, además, sirven de ayuda para que los tratamientos oncológicos con terapias fototérmicas sean menos dañinos para los tejidos sanos. De igual manera, las aplicaciones de las nanopartículas se hacen presentes en la industria textil, automotriz, en los alimentos, construcción, generación de energías limpias, entre otras (figura 1). Se pretende en este artículo proporcionar un panorama general de los avances nanotecnológicos actuales, incluyendo la incorporación en las actividades humanas y formando parte del desarrollo de nuestra sociedad. Es importante mencionar que existen diferentes tipos de nanopartículas (metálicas, semiconductoras, poliméricas, de carbono, aleaciones compuestas). Por consiguiente, las aplicaciones tecnológicas dependen del tipo de nanopartícula y de las características físicas de éstas, como forma, tamaño y material en donde se encuentren estabilizadas.

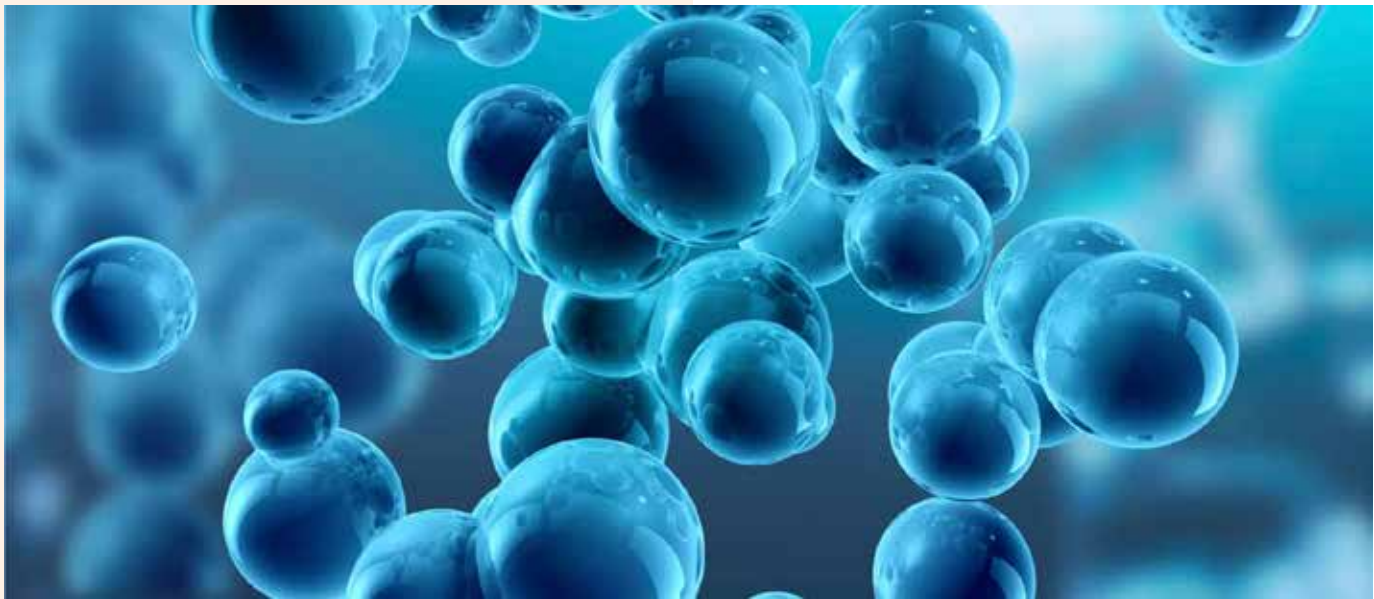


Figura 1. Algunas aplicaciones de las nanopartículas en diferentes áreas de interés científico: nanomedicina, microbiología, aplicaciones industriales y tecnologías emergentes. Fuente: autoría propia.

Nanopartículas como agentes antimicrobianos

Las bacterias son microorganismo que siempre están presentes en nuestra vida cotidiana, la mayoría no representan un peligro, al contrario, son benéficas para las personas y el ecosistema [7], [8]. Las bacterias son necesarias para la preservación de la vida, en el caso de los humanos, pueden protegernos de enfermedades al competir con organismos infecciosos que intentan invadir el organismo, a sanar heridas, digerir la comida, aportar vitaminas y para fermentar alimentos saludables, como el yogur y el queso. Sin embargo, existe un grupo de bacterias consideradas





patógenas (bacterias capaces de causar alguna enfermedad), de la misma forma existen algunos virus y hongos que pueden causar daños en los humanos, las plantas y animales. Por tanto, la nanotecnología busca dar soluciones que permitan combatir eficientemente los microorganismos patógenos, debido a que cada vez las bacterias son más resistentes a los antibióticos utilizados para su control [9]. Algunas variantes genéticas de la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*) pueden producir enfermedades estomacales, insuficiencia renal e incluso la muerte. Asimismo, las infecciones por *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ocasionan daños en la piel, huesos, neumonía, entre otros. Las nanopartículas metálicas han mostrado ser una alternativa altamente eficiente para el control de estos microorganismos, ya que pueden penetrar las paredes celulares de las bacterias causando su muerte celular (figura 2). Por ejemplo, las nanopartículas de plata (AgNPs) han sido ampliamente utilizadas por sus actividades antibacterianas, antifúngicas y antivirales [10]. Se reportó un estudio de AgNPs con una

fuerte actividad antibacteriana contra las bacterias *E. coli* y *S. aureus* usando 15 mL de medio sembrado previamente inoculado con suspensión bacteriana con 10⁵ unidades formadoras de colonias (CFU) del medio, con perforaciones de 10 mm de diámetro con 100 µL de la solución de nanopartículas [11].

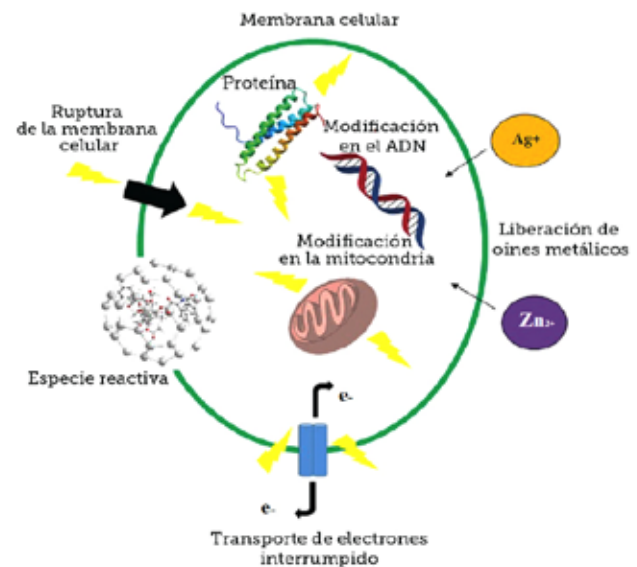


Figura 2. Representación esquemática del efecto antibacteriano de las nanopartículas de plata en las membranas, mitocondrias, organelos celulares, el ADN nuclear, así como en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Fuente: Lira Saldivar R y colaboradores. Potencial de la nanotecnología en la agricultura, (2018) [12].

Recientemente se reportó el uso de nanopartículas de plata con aplicaciones odontológicas incorporadas como



material antibacteriano en resinas para tratamientos de endodoncia y ortodoncia [13]. Otros estudios recientes mostraron resultados importantes de las AgNPs para combatir las bacterias *E. coli* (MTCC-433) y *Salmonella enterica typhimurium* (MTCC-98), las cuales causan infecciones graves, principalmente gastrointestinales y en casos graves sistémicas, en personas y animales, los resultados de la eficacia antibacteriana fueron comparados con fármaco antibiótico ampicilina, las zonas de inhibición de las AgNPs para *E. Coli* y *Salmonella* fueron de 15 mm y 14.5 mm usando 9.5 μg y 19 μg , respectivamente, mientras que para la ampicilina se usaron 10 μg con una zona de inhibición de 0 mm para *E. Coli* y de 16.5 mm para *Salmonella* [14]. Por otra parte, nanopartículas de plata, cobre y magnesio son utilizadas en pinturas para impedir la transmisión indirecta de patógenos a través de superficies con riesgo de contaminación [15], especialmente en entornos de infecciones nosocomiales (infecciones adquiridas durante la estadía en un hospital). También se han estudiado nanopartículas de silicio, selenio y óxido de cobre en recubrimientos antimicrobianos provocando daños oxidativos en las membranas bacterianas y con potenciales aplicaciones para implantes biomédicos [16], [17].

Nanopartículas en aplicaciones médicas

La nanomedicina se puede definir como la aplicación de la nanotecnología en el área médica con el propósito de detectar, prevenir, curar o realizar tratamientos terapéuticos de diversas enfermedades. Por su tamaño, las nanopartículas pueden penetrar los tejidos y viajar por el torrente sanguíneo, ser conducidas con fármacos a lugares de interés para tratamientos tumorales (figura 3). El uso de las nanopartículas en medicina permitiría reducir la mortalidad o aumentar la esperanza de vida en pacientes con enfermedades terminales [18], [19]. Los tratamientos podrían ser menos dolorosos y con menos efectos secundarios que las quimioterapias o radioterapias, ya que las nanopartículas pueden ser direccionadas y en el caso de quimioterapia

y radioterapia, la aplicación es generalmente a todo el organismo. Por ejemplo, uno de los métodos que se ha probado para destruir celular cancerosas sin dañar los tejidos benignos en ratones de laboratorio, consiste en localizar nanopartículas de manera directa en el tumor canceroso y calentarlas a través de un láser en el rango visible [20], [21]. Por otra parte, las vacunas compuestas por cadenas de ácido ribonucleico mensajero (ARNm) actuales (BioNTech/Pfizer y Moderna) contra el SARS-CoV-2 están encapsuladas en nanopartículas lipídicas (LNP) que se encargan de proteger y transportar el ARNm al interior de las células logrando una efectividad contra el virus hasta de un 95% [22]. Las LNP desempeñan un papel clave en la protección y el transporte efectivos del ARNm a las células, evitando que sea eliminado por las defensas naturales del cuerpo, ya que los lípidos prácticamente no son detectables por los agentes inmunitarios, mientras que los ácidos nucleicos sí son detectables [23].

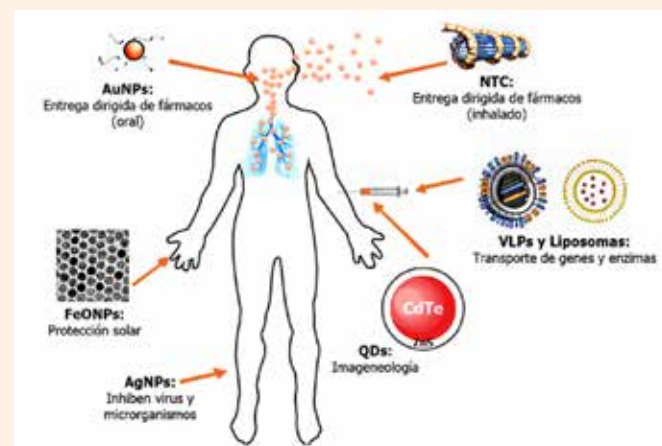
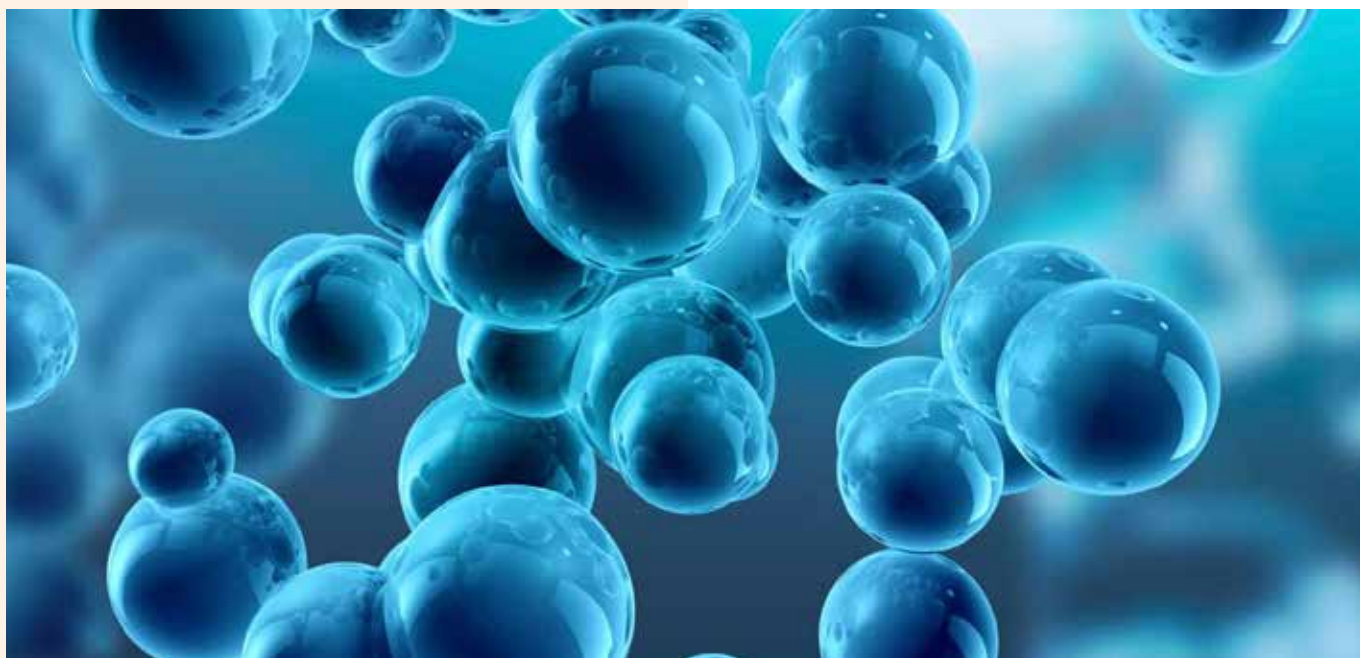


Figura 3. Aplicación de los nanomateriales de interés biomédico. NTC: Nanotubos de carbono; VLPs: Partículas Tipo Virus (por sus siglas en inglés Virus Like Particles); QDs: Puntos cuánticos (por sus siglas en inglés quantum dots), FeONPs: nanopartículas de óxido de hierro; AuNPs: nanopartículas de oro; AgNPs: nanopartículas de plata. Fuente: Vázquez-Muñoz R, Huerta-Saquero A. Toxicidad de los nanomateriales de interés biomédico en los sistemas biológicos, (2018) [24].

Por otra parte, se han explorado una amplia gama de medicamentos usando nanomateriales basados en compuestos orgánicos, inorgánicos, lípidos, polímeros sintéticos, entre otros., para mejorar las terapias contra el cáncer y reducir la toxicidad de los tratamientos fuera del sitio blanco [25], [26]. Los avances recientes en nanotecnología muestran que las propiedades de las nanopartículas magnéticas (MNP) son atractivas para la terapia de hipertermia del cáncer, la administración de fármacos dirigidos y como agentes de contraste para imágenes por resonancia magnética [27]. En el caso de la terapia de hipotermia del



cáncer, las nanopartículas con altos niveles de magnetismo han mostrado un excelente comportamiento en la producción de calor en las regiones del tejido canceroso y pueden localizarse en la zona del tumor mediante la manipulación de un campo magnético. Luego, las nanopartículas son calentadas aplicando un campo magnético alterno y el calor concentrado en el sitio canceroso causa la muerte de las células cancerosas y puede ser considerado como un método eficiente en tratamiento de tumores [28], [29]. Asimismo, se demostró que nanopartículas de óxido de hierro inhiben el crecimiento de células de cáncer de pulmón de células pequeñas (CPCP) previniendo la formación de metástasis hepáticas [30]. Por otra parte, las nanopartículas de óxido de hierro están aprobadas por la agencia del gobierno de los EE. UU. la FDA (Food and Drug Administration, por sus siglas en inglés) [31]. Las nanopartículas de oro (AuNPs) se utilizan ampliamente en métodos de terapia combinatoria contra diferentes tipos de cáncer [32]. Por ejemplo, nanoestructuras de oro similares a palomitas de maíz fueron capaces de producir hipertermia para inducir la ablación del tumor y desencadenar la liberación del fármaco quimioterapéutico doxorubicina (DOX), logrando una terapia combinatoria quimio-fototérmica con una tasa de inhibición tumoral de hasta el 98,6 % y efectos secundarios reducidos [33]. Las nanopartículas de oro pueden absorber luz en longitudes de onda específicas, ideal para los tratamientos de terapias fototérmicas y aplicaciones de imágenes médicas [34]. Las nanopartículas de tamaño mediano entre 5 -100 nm son óptimas para la entrega eficiente de antígenos tumorales a los ganglios

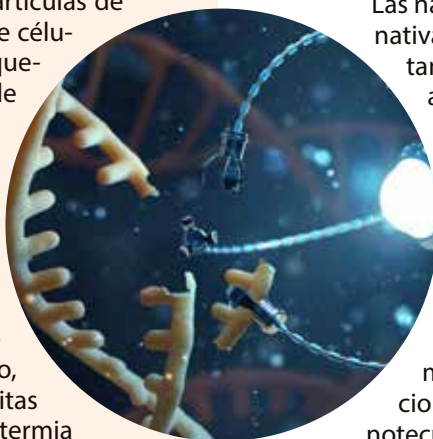
linfáticos [18]. La idea principal, cómo ya se había mencionado, es localizar a las nanopartículas metálicas en los tumores, aplicar un láser para calentarlas, con el fin de matar a las células cancerosas y posteriormente excretarse de manera segura a través del sistema urinario [35]. Por tanto, las nanopartículas desempeñan un papel importante en el desarrollo de la medicina moderna.

Nanopartículas en la industria

Las nanopartículas son usadas como una alternativa para enfrentar los retos que se presentan en la actualidad y desarrollar productos apropiados que sean de utilidad para necesidades humanas y al mismo tiempo cuiden el medio ambiente. Por ejemplo, se requieren de industrias que produzcan cada vez más energías limpias. Se requieren de estrategias que eviten el desperdicio de los alimentos a nivel mundial, mejorar la calidad de las telas, cosméticos, refacciones de automóviles, mejorar la calidad del agua, etc. Se mencionan a continuación algunos avances nanotecnológicos en la industria textil, automotriz y en la agroindustria.

Nanopartículas en el sector textil

Las nanopartículas en sector textil pueden mejorar las propiedades de las telas, además de presentar otras ventajas atractivas para los consumidores. Por ejemplo, se pueden tener telas más resistentes y que conserven su calidad con el paso del tiempo, telas con propiedades antibacteriales, que se reflejaría en una prenda limpia y sin atrapar malos olores, telas repelentes al agua, resistencia mecáni-





ca, protección balística, componentes electrónicos incorporados, entre otras [36]. Incluso se han fabricado telas con nanopartículas incorporadas para fabricar mascarillas que brinden una mayor protección contra el SARS-CoV-2. Recientemente se reportó el uso de una tela con nanopartículas de plata incrustadas exhibiendo una reducción viral del 97 % específica para el SARS-CoV-2. Además de su excelente propiedad antiviral, también mostró su potencial antimicrobiano contra uno de los virotipos patogénicos humanos de *E. coli* y el hongo *Aspergillus niger* [37]. Así mismo, tela de mezclilla con nanopartículas de sílice presentó características mejoradas, mayor resistencia al calor, fuerza, tasa de absorción de agua, permeabilidad al aire y propiedades de autolimpieza [38]. Por tanto, se espera que, en el futuro cercano, las telas con nanopartículas sean cada vez más comunes y su producción industrial a gran escala aumente.

Nanopartículas en el sector automotriz

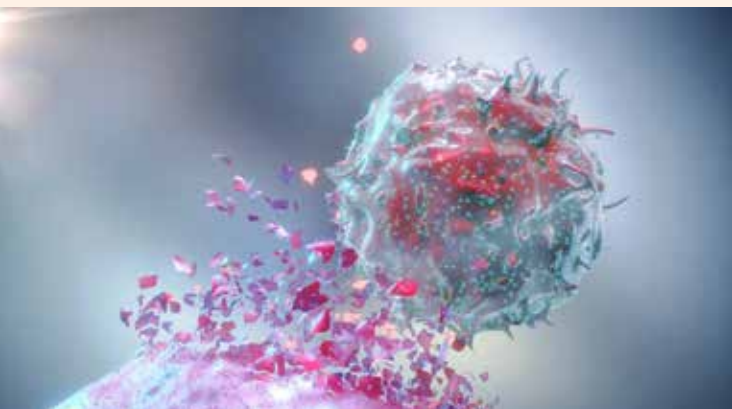
Es común ver publicidad sobre productos referentes a recubrimientos nano-cerámicos en automóviles para restauración de plásticos y pinturas, eliminación de rayones, formación de capas protectoras repelentes de la suciedad y líquidos, hasta dar un acabado tipo espejo, con garantías de 3-5 años. Por lo general, estos nanorecubrimientos inteligentes están compuestos de un nanomaterial y una matriz polimérica. Por ejemplo, nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y dióxido de zirconio (ZrO_2) se combinan con el poliuretano para evitar la degradación de los materiales y ayudar a prolongar la vida útil del acero revestido [39]. Pero las nanopartículas en el sector automotriz no sólo están enfocadas en la parte estética del automóvil, también se busca reducir las emisiones de gases a través del escape, así como mejorar la eficiencia en la utilización del combustible. En ese sentido, nanopartículas de paladio y cobre han sido utilizadas para la eliminación de gases a través del escape de los automóviles [40]. Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NPs) mejoran la trans-

ferencia de calor por convección forzada de un radiador, debido a las excelentes propiedades térmicas de los nano fluidos de ZnO , como el bajo calor específico y la alta conductividad térmica en comparación con el agua pura [41]. Asimismo, nanotubos de carbono (CNT) y nanopartículas de TiO_2 se han utilizado para mejorar las características del combustible, los parámetros de emisión y rendimiento del motor [42], los resultados fueron comparados con diésel comercial B30. El estudio mostró que el uso de TiO_2 como aditivo, mejora la combustión del combustible debido a la elevada temperatura y presión en el cilindro. Por otro lado, la eficiencia térmica del arranque para el B30 + CNT en comparación con otras mezclas de combustible, se debió a su alta superficie químicamente reactiva que actúa como un catalizador de combustión adecuado durante la quema del combustible.

Nanopartículas en la agroindustria

Las nanopartículas también desempeñan un rol muy importante en la producción, industrialización y comercialización de productos agroalimentarios. Las nanopartículas de óxido de cobre (CuO NPs) y óxido ferroso-férrico (Fe_3O_4) son usadas como fertilizantes para mejorar los cultivos y como estrategia sostenible debido al crecimiento de la población mundial, la escasez de fuentes de energía y la reducción de la tierra cultivable. Las nanopartículas contribuyen a que las plantas tengan una mejor absorción de los nutrientes, además de una mejor producción y calidad en las cosechas [43], [44]. Nanopartículas de óxidos metálicos son utilizadas para envases alimentarios seguros, activos e inteligentes, con el propósito de preservar la calidad de los alimentos aumentando la eficacia antimicrobiana y evitando el deterioro de los alimentos [45], [46]. Envases activos e inteligentes se refiere a que las NPs con actividad antimicrobiana intrínseca pueden llevar a cabo la eliminación del oxígeno, el etileno y el bloqueo de los rayos UV como parte de las funciones activas del envase, contribuyendo a extender la vida útil del producto, además que las partículas añadidas al material de envasado interactúan directamente con los alimentos y los protegen de las bacterias dañinas, los hongos y virus, proporcionando frescura durante un mayor tiempo de almacenamiento. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO (por sus siglas en inglés) casi 1,300 millones de toneladas de alimentos son desperdiciados cada año en todo el mundo desde la producción hasta llegar a los hogares de los consumidores. Por tanto, la nanotecnología aplicada en la industria busca contribuir para minimizar este desperdicio, así como los daños que esto produce, como las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación y tratamiento de los residuos.

Finalmente, es importante considerar los efectos negativos que puedan tener las nanopartículas en el medio ambiente y la salud, así como los costos adicionales que puedan generar la obtención y aplicación de los nanomateriales a nivel industrial. Los estudios *in vitro* e *in vivo*



indican que la exposición a nanopartículas podría inducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), provocando estrés oxidativo, inflamación y daño posterior a las proteínas, las membranas celulares y el ADN [47]. Por ejemplo, en el caso de las AuNPs se han evaluado los aspectos toxicológicos in vivo e in vitro indicando hasta cierto punto daño oxidativo en tejidos y líneas celulares del hígado, el bazo y el riñón [48]. Aunque algunos estudios han demostrado que las AuNPs no son tóxicas, otros estudios contradicen esta afirmación [49]. Es importante considerar que la toxicidad de las nanopartículas también depende de sus propiedades fisicoquímicas como el tamaño, la forma, la superficie, la composición, la solubilidad, entre otros [50]. Por otra parte, se han explorado nuevas alternativas para reducir los efectos de toxicidad y disminuir los costos, como los procesos de “química verde” que buscan encontrar un equilibrio entre costos y beneficios para usos de nanomateriales a gran escala [51]. Por tanto, aún falta mucha investigación para determinar los efectos medioambientales de los nanomateriales y su impacto en la vida humana.

CONCLUSIONES

Los avances nanotecnológicos se han convertido en una alternativa altamente eficiente para dar soluciones específicas en ciertas áreas de la ciencia y la tecnología. Se ha mostrado que ciertos materiales como pinturas, telas, polímeros, alimentos, etc., pueden adquirir nuevas propiedades o mejorar sus características físicas y químicas al ser adicionados con nanopartículas. Además, la importancia de los nanomateriales aplicados a la medicina resulta altamente eficaz para tratar diversas enfermedades. Se espera que las aplicaciones nanotecnológicas aumenten y que se realicen nuevas investigaciones relacionadas con la toxicidad de nanomateriales, ideal para tener un control de las cantidades óptimas que se deben usar y que no representen daño a los humanos y el medio ambiente. En ese sentido, en un futuro cercano se tendrá una mayor interacción con nanopartículas, sin siquiera notarlo.

AGRADECIMIENTOS

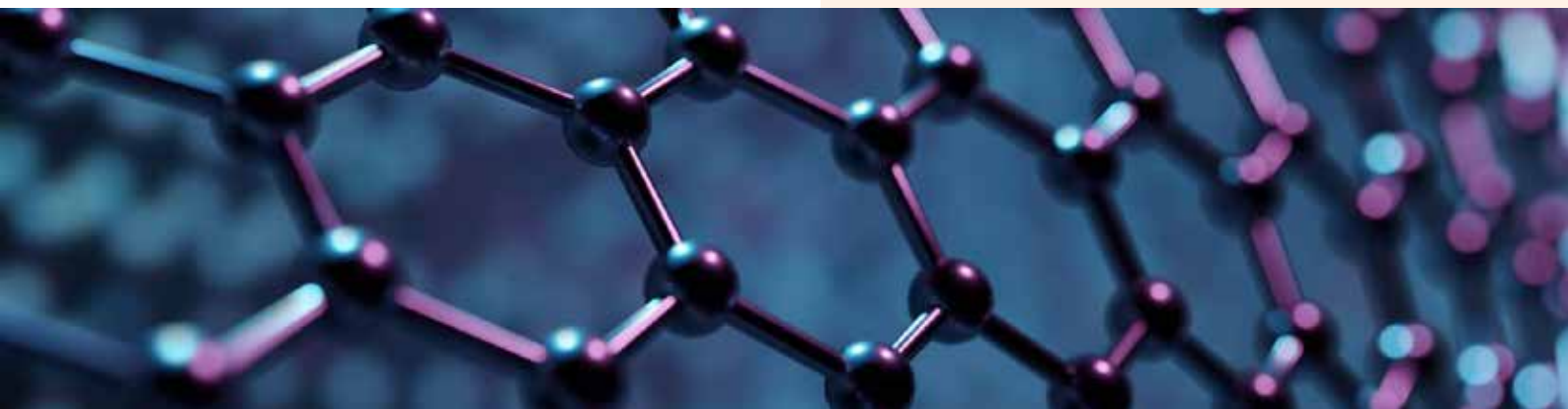
Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado durante la estancia pos-

doctoral. Se agradece especialmente el apoyo brindado a la Universidad Estatal de Sonora a través del proyecto UES-PII-20-UAH-IG-02. El autor Manuel Cortez-Valadez agradece el apoyo del Proyecto A1-S-46242 de Ciencia Básica del CONACYT.

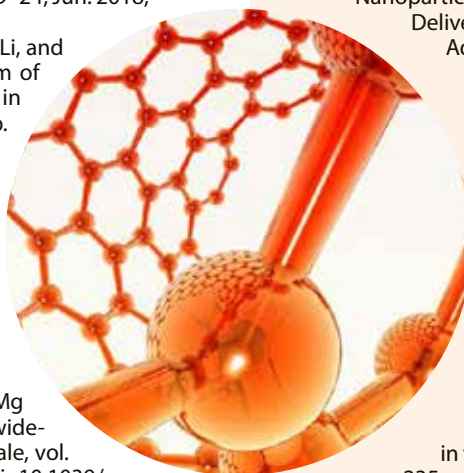
BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Amendola, R. Pilot, M. Frascioni, O. M. Maragò, and M. A. latì, “Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 29, no. 20, p. 203002, Apr. 2017, doi: 10.1088/1361-648X/AA60F3.
- [2] L. Lee, G. Seddon, F. Stephens, S. Halliday, and L. Lushington, “Stained glass,” p. 207, 1976.
- [3] B. G. Chiari-Andréo, M. G. J. De Almeida-Cincotto, J. A. Oshiro, C. Y. Y. Taniguchi, L. A. Chiavacci, and V. L. B. Isaac, “Nanoparticles for cosmetic use and its application,” *Nanoparticles Pharmacother.*, pp. 113–146, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-816504-1.00013-2.
- [4] H. Joshi et al., “Sunscreen creams containing naringenin nanoparticles: Formulation development and in vitro and in vivo evaluations,” *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.*, vol. 34, no. 1, pp. 69–81, Jan. 2018, doi: 10.1111/PHPP.12335.
- [5] K. N. M. Dantas et al., “Antimycotic nail polish based on humic acid-coated silver nanoparticles for onychomycosis,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 96, no. 8, pp. 2208–2218, Aug. 2021, doi: 10.1002/JCTB.6676.
- [6] M. Abdukhakimov, R. Khaydarov, P. T. Krishnamurthy, and S. Evgrafova, “Silver-Nanoparticle-Embedded Antimicrobial Paints,” *Handb. Consum. Nanoproducts*, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-6453-6_105-1.
- [7] J. E. Brame, C. Liddicoat, C. A. Abbott, and M. F. Breed, “The potential of outdoor environments to supply beneficial butyrate-producing bacteria to humans,” *Sci. Total Environ.*, vol. 777, p. 146063, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SCIOTENV.2021.146063.
- [8] H. Wang, C. X. Wei, L. Min, and L. Y. Zhu, “Good or bad: gut bacteria in human health and diseases,” <http://mc.manuscriptcentral.com/tbeq>, vol. 32, no. 5, pp. 1075–1080, Sep. 2018, doi: 10.1080/13102818.2018.1481350.
- [9] L. Serwecińska, “Antimicrobials and Antibiotic-Resistant Bacteria: A Risk to the Environment and to Public Health,” *Water* 2020, Vol. 12, Page 3313, vol. 12, no. 12, p. 3313, Nov. 2020, doi: 10.3390/W12123313.





- [10] S. Tang and J. Zheng, "Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles: Structural Effects," *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 7, no. 13, p. 1701503, Jul. 2018, doi: 10.1002/ADHM.201701503.
- [11] X. H. Vu, T. T. T. Duong, T. T. H. Pham, D. K. Trinh, X. H. Nguyen, and V. S. Dang, "Synthesis and study of silver nanoparticles for antibacterial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*," *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 9, no. 2, p. 025019, Jun. 2018, doi: 10.1088/2043-6254/AAC58F.
- [12] R. H. Lira Saldivar et al., "Potencial de la nanotecnología en la agricultura," *Acta Univ.*, vol. 28, no. 2, pp. 9–24, Jun. 2018, doi: 10.15174/AU.2018.1575.
- [13] I. X. Yin, J. Zhang, I. S. Zhao, M. L. Mei, Q. Li, and C. H. Chu, "The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry," *Int. J. Nanomedicine*, vol. 15, p. 2555, 2020, doi: 10.2147/IJN.S246764.
- [14] M. Chandhru, R. Logesh, S. K. Rani, N. Ahmed, and N. Vasimalai, "One-pot green route synthesis of silver nanoparticles from jack fruit seeds and their antibacterial activities with *Escherichia coli* and *Salmonella* bacteria," *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 20, p. 101241, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.BCAB.2019.101241.
- [15] G. Benetti et al., "Tailored Ag–Cu–Mg multielemental nanoparticles for wide-spectrum antibacterial coating," *Nanoscale*, vol. 11, no. 4, pp. 1626–1635, Jan. 2019, doi: 10.1039/C8NR08375D.
- [16] A. Nastulyavichus et al., "Antibacterial coatings of Se and Si nanoparticles," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 469, pp. 220–225, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.APSUSC.2018.11.011.
- [17] S. Tavakoli, S. Nemati, M. Kharaziha, and S. Akbari-Alavijeh, "Embedding CuO Nanoparticles in PDMS-SiO₂ Coating to Improve Antibacterial Characteristic and Corrosion Resistance," *Colloid Interface Sci. Commun.*, vol. 28, pp. 20–28, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.COLCOM.2018.11.002.
- [18] W. Park, Y. J. Heo, and D. K. Han, "New opportunities for nanoparticles in cancer immunotherapy," *Biomater. Res.*, vol. 22, no. 1, p. e27614, Sep. 2018, doi: 10.1186/S40824-018-0133-Y/FIGURES/5.
- [19] K. Orthaber, M. Pristovnik, K. Skok, B. Perić, and U. Maver, "Skin Cancer and Its Treatment: Novel Treatment Approaches with Emphasis on Nanotechnology," *J. Nanomater.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/2606271.
- [20] Y. Zheng, Z. Li, H. Chen, and Y. Gao, "Nanoparticle-based drug delivery systems for controllable photodynamic cancer therapy," *Eur. J. Pharm. Sci.*, vol. 144, p. 105213, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.EJPS.2020.105213.
- [21] M. A. Safwat, G. M. Soliman, D. Sayed, and M. A. Attia, "Fluorouracil-Loaded Gold Nanoparticles for the Treatment of Skin Cancer: Development, in Vitro Characterization, and in Vivo Evaluation in a Mouse Skin Cancer Xenograft Model," *Mol. Pharm.*, vol. 15, no. 6, pp. 2194–2205, Jun. 2018, doi: 10.1021/ACS.MOLPHARMACEUT.8B00047/ASSET/IMAGES/ACS.MOLPHARMACEUT.8B00047.SOCIALJPEG_V03.
- [22] L. Schoenmaker et al., "mRNA-lipid nanoparticle COVID-19 vaccines: Structure and stability," *Int. J. Pharm.*, vol. 601, p. 120586, May 2021, doi: 10.1016/J.IJPHARM.2021.120586.
- [23] R. Tenchov, R. Bird, A. E. Curtze, and Q. Zhou, "Lipid Nanoparticles from Liposomes to mRNA Vaccine Delivery, a Landscape of Research Diversity and Advancement," *ACS Nano*, vol. 15, no. 11, pp. 16982–17015, Nov. 2021, doi: 10.1021/ACS.NANO.1C04996/SUPPL_FILE/NN1C04996_SI_001.PDF.
- [24] R. Vázquez-Muñoz, A. Huerta-Saquero, R. Vázquez-Muñoz, and A. Huerta-Saquero, "Toxicidad de los nanomateriales de interés biomédico en los sistemas biológicos," *Mundo nano.Rev. Interdiscip. en nanociencias y nanotecnología*, vol. 11, no. 20, pp. 65–75, Jun. 2018, doi: 10.22201/CEIICH.24485691E.2018.20.62715.
- [25] A. Aghebati-Maleki et al., "Nanoparticles and cancer therapy: Perspectives for application of nanoparticles in the treatment of cancers," *J. Cell. Physiol.*, vol. 235, no. 3, pp. 1962–1972, Mar. 2020, doi: 10.1002/JCP.29126.
- [26] D. J. Irvine and E. L. Dane, "Enhancing cancer immunotherapy with nanomedicine," *Nat. Rev. Immunol.* 2020 205, vol. 20, no. 5, pp. 321–334, Jan. 2020, doi: 10.1038/s41577-019-0269-6.
- [27] A. Farzin, S. A. Etesami, J. Quint, A. Memic, and A. Tamayol, "Magnetic Nanoparticles in Cancer Therapy and Diagnosis," *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 9, no. 9, p. 1901058, May 2020, doi: 10.1002/ADHM.201901058.
- [28] W. Xue et al., "AMF responsive DOX-loaded magnetic microspheres: transmembrane drug release mechanism and multimodality postsurgical treatment of breast cancer," *J. Mater. Chem. B*, vol. 6, no. 15, pp. 2289–2303, Apr. 2018, doi: 10.1039/C7TB03206D.
- [29] X. Li et al., "Enhanced tumor targeting effects of a novel paclitaxel-loaded polymer: PEG-PCCL-modified magnetic iron oxide nanoparticles," *Drug Deliv.*, vol. 24, no. 1, pp. 1284–1294, 2017, doi: 10.1080/10717544.2017.1373167.
- [30] S. Zanganeh et al., "Iron oxide nanoparticles inhibit tumour growth by inducing pro-inflammatory macrophage polarization in tumour tissues," *Nat. Nanotechnol.* 2016 1111, vol. 11, no. 11, pp. 986–994, Sep. 2016, doi: 10.1038/nnano.2016.168.



[31] F. Soetaert, P. Korangath, D. Serantes, S. Fiering, and R. Ivkov, "Cancer therapy with iron oxide nanoparticles: Agents of thermal and immune therapies," *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 163–164, pp. 65–83, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.ADDR.2020.06.025.

[32] J. Beik et al., "Gold nanoparticles in combinatorial cancer therapy strategies," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 387, pp. 299–324, May 2019, doi: 10.1016/J.CCR.2019.02.025.

[33] D. Zhang, X. Qin, T. Wu, Q. Qiao, Q. Song, and Z. Zhang, "Extracellular vesicles based self-grown gold nanopopcorn for combinatorial chemo-photothermal therapy," *Biomaterials*, vol. 197, pp. 220–228, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2019.01.024.

[34] J. B. Vines, J. H. Yoon, N. E. Ryu, D. J. Lim, and H. Park, "Gold nanoparticles for photothermal cancer therapy," *Front. Chem.*, vol. 7, no. APR, p. 167, 2019, doi: 10.3389/FCHEM.2019.00167/BIBTEX.

[35] R. Ahmad, J. Fu, N. He, and S. Li, "Advanced gold nanomaterials for photothermal therapy of cancer," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 16, no. 1, pp. 67–80, Jan. 2016, doi: 10.1166/JNN.2016.10770.

[36] H. R. Hong, J. Kim, and C. H. Park, "Facile fabrication of multifunctional fabrics: use of copper and silver nanoparticles for antibacterial, superhydrophobic, conductive fabrics," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 73, pp. 41782–41794, Dec. 2018, doi: 10.1039/C8RA08310J.

[37] A. Kumar, K. Nath, Y. Parekh, M. G. Enayathullah, K. K. Bokara, and A. Sinhamahapatra, "Antimicrobial silver nanoparticle-photodeposited fabrics for SARS-CoV-2 destruction," *Colloid Interface Sci. Commun.*, vol. 45, p. 100542, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.COLCOM.2021.100542.

[38] S. Talebi and M. Montazer, "Denim Fabric with Flame retardant, hydrophilic and self-cleaning properties conferring by in-situ synthesis of silica nanoparticles," *Cellul.* 2020 2711, vol. 27, no. 11, pp. 6643–6661, May 2020, doi: 10.1007/S10570-020-03195-6.

[39] J. R. Xavier, "Electrochemical and dynamic mechanical properties of polyurethane nanocomposite reinforced with functionalized TiO₂-ZrO₂ nanoparticles in automobile industry," *Appl. Nanosci.* 2022, pp. 1–16, Feb. 2022, doi: 10.1007/S13204-022-02393-X.

[40] W. J. Li and M. Y. Wey, "Dual immobilization of PdCu nanoparticles on halloysite nanotubes by CTAB and PVP for automobile exhaust elimination," *Appl. Clay Sci.*, vol. 214, p. 106299, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.CLAY.2021.106299.

[41] M. Qasim, M. Sajid Kamran, M. Ammar, M. Ali Jamal, and M. Yasar Javaid, "Heat Transfer Enhancement of an Automobile Engine Radiator using ZnO Water Base Nanofluids," *J. Therm. Sci.* 2020 294, vol. 29, no. 4, pp. 1010–1024, Apr. 2020, doi: 10.1007/S11630-020-1263-9.

[42] M. A. Mujtaba et al., "Comparative study of nanoparticles and alcoholic fuel additives-biodiesel-diesel blend for performance and emission improvements," *Fuel*, vol. 279, p. 118434, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.118434.

[43] M. S. Haydar, S. Ghosh, and P. Mandal, "Application of Iron Oxide Nanoparticles as Micronutrient Fertilizer in Mulberry Propagation," *J. Plant Growth Regul.* 2021, pp. 1–21, Jun. 2021, doi: 10.1007/S00344-021-10413-3.

[44] Y. Wang, Y. Lin, Y. Xu, Y. Yin, H. Guo, and W. Du, "Divergence in response of lettuce (var. ramosa Hort.) to copper oxide nanoparticles/microparticles as potential agricultural fertilizer," <https://doi.org/10.1080/2639594.0.2019.1578187>, vol. 31, no. 1, pp. 80–84, Jan. 2019, doi: 10.1080/26395940.2019.1578187.

[45] A. Bahrami, R. Delshadi, S. M. Jafari, and L. Williams, "Nanoencapsulated nisin: An engineered natural antimicrobial system for the food industry," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 94, pp. 20–31, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.

TIFS.2019.10.002.

[46] M. V. Nikolic, Z. Z. Vasiljevic, S. Auger, and J. Vidic, "Metal oxide nanoparticles for safe active and intelligent food packaging," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 116, pp. 655–668, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.TIFS.2021.08.019.

[47] A. B. Sengul and E. Asmatulu, "Toxicity of metal and metal oxide nanoparticles: a review," *Environ. Chem. Lett.* 2020 185, vol. 18, no. 5, pp. 1659–1683, Jun. 2020, doi: 10.1007/S10311-020-01033-6.

[48] C. Lopez-Chaves, J. Soto-Alvaredo, M. Montes-Bayon, J. Bettmer, J. Llopis, and C. Sanchez-Gonzalez, "Gold nanoparticles: Distribution, bioaccumulation and toxicity. In vitro and in vivo studies," *Nanomedicine Nanotechnology, Biol. Med.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.NANO.2017.08.011.

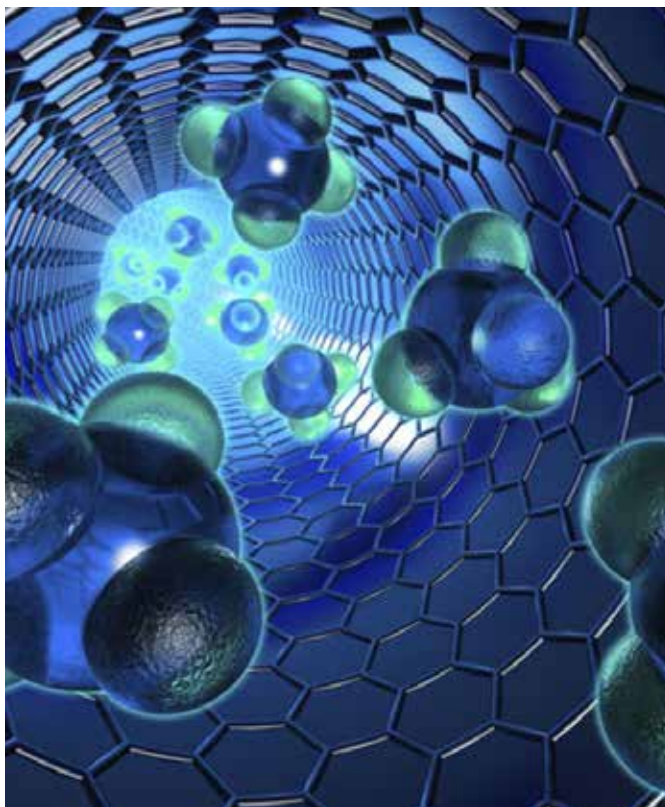
[49] A. Sani, C. Cao, and D. Cui, "Toxicity of gold nanoparticles (AuNPs): A review," *Biochem. Biophys. Reports*, vol. 26, p. 100991, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.BBREP.2021.100991.

[50] C. S. Yah, "The toxicity of gold nanoparticles in relation to their physiochemical properties," *Biomed. Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 400–413, 2013.

[51] S. S. Salem and A. Fouda, "Green Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Prospective Biotechnological Applications: an Overview," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 199, no. 1, pp. 344–370, Jan. 2021, doi: 10.1007/S12011-020-02138-3/FIGURES/5.

Cómo citar este artículo:

Britto Hurtado, R., Cortez Valadez, M., & Flores Acosta, M. (2022). APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LAS NANOPARTÍCULAS EN LA MEDICINA E INDUSTRIA. *EPISTEMUS*, 16(33).
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.223>



Aprendiendo a revalorizar los subproductos y su aplicación en productos cárnicos

Learning to revalue by-products and their application in meat products

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Silvia Betzabe Ordaz- Rodríguez¹
Lucía Abadía- García²
Aurora Femat-Díaz³
Magdalena Mendoza-Sánchez*⁴

Recibido: 31 / 05 / 2022

Aceptado: 19 / 07 / 2022

Publicado: 25 / 07 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.227>

Autor de Correspondencia:
Magdalena Mendoza-Sánchez
Correo: magdalena.mendoza@uaq.mx

Resumen

Uno de los grandes problemas que enfrenta la sociedad actual, es la enorme cantidad de desechos que se generan en la industria agroalimentaria. Estos subproductos, que aún poseen compuestos potencialmente útiles, pueden representar una nueva fuente de recursos renovables para su uso como aditivos alimentarios. Lo anterior, puede permitir establecer iniciativas de desarrollo sostenible para mitigar problemas ambientales, y al mismo tiempo, desarrollar productos con un valor nutricional mejorado. Recientemente, se ha buscado incluir ingredientes y conservadores más naturales en la producción de alimentos. Es en la industria cárnica, donde se tiene especialmente un problema de descomposición y oxidación de los productos. El objetivo del presente artículo de divulgación es dar a conocer el trabajo que, desde la ciencia de los alimentos, se hace por mejorar el procesamiento y la calidad de los productos cárnicos, a través del uso de subproductos.

Palabras clave: subproductos, Revalorización, Aditivos naturales, Antioxidantes, Alimento funcional.

Abstract

One of society's major problems today is the enormous amount of waste generated by the agri-food industry. These by-products, which still contain potentially valuable compounds, can represent a new source of renewable resources as food additives. This may allow the establishment of sustainable development initiatives to mitigate environmental problems and, at the same time, develop products with improved nutritional value. Recently, it has been searched included more natural ingredients and preservatives in food production. In the meat industry, there is a particular problem of decomposition and oxidation of products. The objective of this article is to publicize the work being done in food science to improve the processing and quality of meat products through the use of by-products.

Keywords: by-products, Revaluation, Natural additives, Antioxidants, Functional food.

¹ Estudiante de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, silviaord.85@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6370-5804

² Doctorado, Innovación y Desarrollo de Alimentos, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, lucia.abadiag@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0955-4520

³ Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, afemat@uaq.mx, ORCID: 0000-0002-3322-3660

⁴ Doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, magdalena.mendoza@uaq.mx, ORCID: 0000-0002-0596-4947



INTRODUCCIÓN

Anualmente, se pierden o desperdician un tercio de los alimentos producidos en todo el mundo, esta cifra corresponde aproximadamente a 1 300 millones de toneladas, lo que representa un costo de alrededor de 936 mil millones de dólares [1].

La transformación y procesamiento de frutas y verduras, en productos de la industria alimentaria, genera un gran volumen de subproductos y residuos que, en ocasiones, supone un mal uso de recursos como el agua, la tierra, o la energía. Esto da lugar a muchos problemas, uno de los principales, es la emisión de gases contaminantes derivada de la descomposición natural de estos alimentos. Queda claro que, la pérdida y el desperdicio de alimentos, genera impactos adversos de importancia: económicos, ambientales y sociales.

Muchas frutas y vegetales, como naranjas, piñas, granadas, manzanas, papas, zanahorias, aguacates y cebollas, se utilizan para la extracción de jugo o pulpa, y para la producción de mermeladas y productos congelados, generando grandes cantidades de desechos [2]. Varios estudios han demostrado que estos residuos son una importante fuente de antioxidantes y compuestos fenólicos, incluso mayor que la pulpa de la fruta usada [3].

Por otro lado, la carne y sus derivados desempeñan un papel esencial en la alimentación, debido a su alto contenido de proteínas y aminoácidos necesarios para el correcto funcionamiento del cuerpo, y que, a su vez, contribuyen al crecimiento, mantenimiento y reparación de los propios tejidos.

Los cambios en los hábitos alimenticios y estilo de vida de los consumidores de productos cárnicos, han originado

que en la industria se produzcan nuevos productos cárnicos, listos para comer y procurando que sean saludables; lo que ha llevado a los procesadores de carne a utilizar aditivos seguros o compuestos bioactivos de fuentes naturales [3], [4]. Para responder a este desafío, la comunidad científica ha buscado proporcionar e informar alternativas naturales que pueden obtenerse a partir de subproductos agroalimentarios.

El uso adecuado de los subproductos, puede establecer una iniciativa de desarrollo sostenible, contribuyendo a

mitigar los problemas ambientales y a mejorar la salud humana, ya que sí se reutilizan como aditivos alimentarios, enriquecen la carne y sus derivados con sustancias como fenoles, fibras dietéticas, vitaminas, entre varios otros [2].

Por tanto, en este documento se pretende incentivar al lector a reflexionar y adquirir a través de la información presentada, un aprendizaje de cómo se le puede dar a es-

tos subproductos, una segunda oportunidad, a través de ejemplos de revalorización y su aplicación en productos cárnicos.

¿CÓMO SE GENERAN LOS SUBPRODUCTOS? Y SU IMPORTANCIA

Como se mencionó anteriormente, muchas frutas y verduras son utilizadas en la industria de los alimentos. En la Figura 1, se resume el proceso de obtención de los desechos. En particular, las frutas se ocupan para la producción de jugos, y en algunos casos, mermeladas, utilizando solamente la pulpa, y dejando a un lado la cáscara y las semillas. En el caso de los vegetales, estos se emplean en su mayoría para salsas o cremas, ocupando, de igual manera, solamente la pulpa. Al desperdicio de la piel, semillas, ho-





jas y tallos, hay que sumar las cantidades de frutas o verduras descartadas por no estar lo suficientemente maduras o presentar golpes, cortes, u otros aspectos que reducen su calidad.

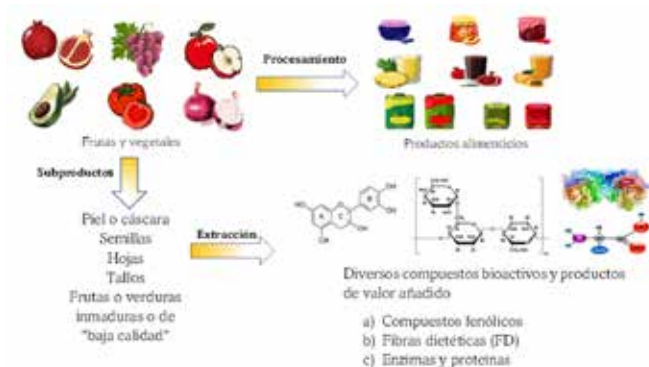


Figura 1. Ilustración gráfica del procesamiento de frutas y vegetales y la obtención de sus subproductos.

Por mencionar algunos ejemplos, los subproductos de la industria del vino incluyen orujo de uva (pieles, pulpa y semillas) y constituyen del 15 % al 20 % del peso total de la uva. De igual manera, el orujo de manzana es el principal subproducto producido después de la extracción del jugo de manzana, y representa hasta el 30 % de la fruta; contiene alrededor del 95 % de piel o pulpa, 4 % de semillas y 1 % de tallo [5]. Por otra parte, en la producción de jugo de granada, una tonelada de fruta fresca genera 669 kg de subproducto, compuesto por el 78 % de cáscara y 22 % de semillas [6]. De la misma forma, el pelado de mandarinas genera alrededor del 16 % de cáscara. El procesamiento de la piña produce alrededor del 14 % de cáscaras, 9 % del corazón, y 15 % de pulpa [2]. Como se puede observar, en general los subproductos del procesamiento industrial de frutas consisten principalmente en semillas, cáscaras y pulpa sin usar. De forma regular, la industria de alimentos deshecha estos subproductos, sin considerar el darles una revalorización o uso.

En aras de dar una segunda oportunidad a estos, cabe resaltar que, los subproductos agroindustriales son considerados una fuente barata de compuestos bioactivos va-

lios, como son fibras, aminoácidos, compuestos fenólicos antioxidantes, entre otros. Las diferentes propiedades de estos compuestos permiten su reciclaje dentro de la cadena alimentaria como aditivos alimenticios e ingredientes nutraceuticos, al ejercer efectos benéficos para la misma industria de alimentos y la salud de los consumidores. Sumado a lo anterior, su procesamiento minimiza los efectos ambientales de su eliminación y permite la sostenibilidad de ingredientes de alto valor agregado dentro de la cadena alimentaria, promoviendo así, un concepto de economía circular [4].

DETERIORO DE LAS PROPIEDADES DE CALIDAD DE LA CARNE

La carne es el tejido animal, principalmente muscular, que ha sido dictaminado como inocuo y apto para el consumo humano. Con relación a su composición química, la carne se compone de agua, proteínas y aminoácidos, grasas, minerales, vitaminas y otros componentes bioactivos, así como pequeñas cantidades de carbohidratos [7]. Desde el punto de vista nutricional, la importancia de la carne deriva de sus proteínas de alta calidad, que contienen todos los aminoácidos esenciales, así como de minerales y vitaminas de elevada biodisponibilidad, necesarias en el desarrollo muscular [8].

A pesar de tener proteínas de alto valor biológico y nutrientes esenciales, la carne y los productos cárnicos son altamente susceptibles a la oxidación de lípidos y proteínas, y algunas veces deficientes en carbohidratos complejos como la fibra dietética (FD). Por lo que, se vuelve necesario prevenir el deterioro de estos productos debido a la acción de microorganismos asociados a la descomposición, así como alteraciones sensoriales y nutricionales, entre otros, para evitar la pérdida de calidad durante el almacenamiento [4].

Entre las reacciones de deterioro más comunes en los productos cárnicos, y de mayor interés, se encuentran las reacciones de oxidación (rancidez) asociadas a cambios en el sabor, el color, el valor nutricional y la textura, así como la generación de compuestos tóxicos.

La Figura 2, explica el impacto negativo de la oxidación de lípidos en la carne, lo que produce olores desagradables y la ranciedad del producto. Mientras que, durante la oxidación de proteínas, se produce una disminución de la calidad nutricional del producto [9].



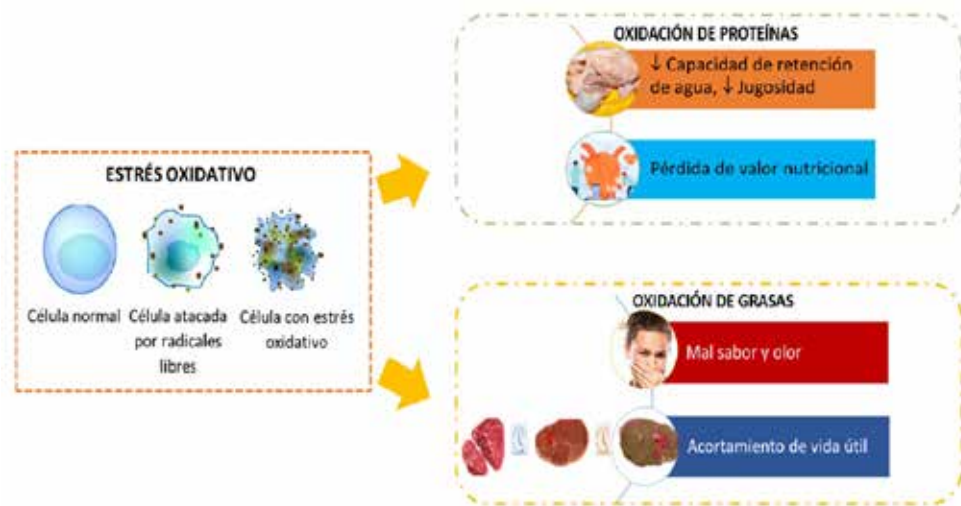


Figura 2. Efectos adversos que tiene la oxidación de lípidos y proteínas en la carne.

Es por esto que, los antioxidantes juegan un papel importante en la prevención y disminución de la formación de radicales libres, los cuales son responsables de la oxidación de moléculas susceptibles como lípidos (grasas) y proteínas en la carne y sus derivados [9].

Es por todo esto que, el propósito de fortificar o enriquecer las formulaciones de productos cárnicos no solo va dirigido a lograr las funciones deseadas, es decir, aumentar su valor nutricional, mejorar los atributos sensoriales al influir en sus propiedades fisicoquímicas; sino también a extender la vida útil del producto al inhibir la oxidación y el crecimiento microbiano durante su almacenamiento [10].

En este sentido, los compuestos obtenidos de fuentes naturales son de gran interés por sus características de seguridad y salud. Estos ingredientes funcionales, no sólo influyen en las características fisicoquímicas de los productos cárnicos, sino que también enriquecen su valor nutritivo y funcional, como se puede observar en la Figura 3.

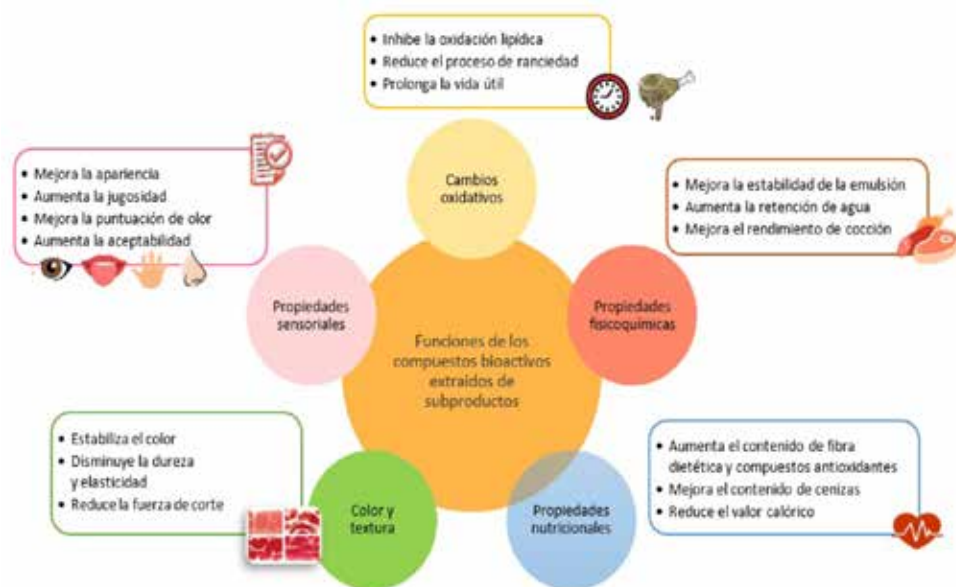


Figura 3. Diagrama esquemático que muestra los efectos de los compuestos bioactivos sobre los atributos de calidad de la carne y los productos cárnicos.

FUNCIONES DE LOS COMPUESTOS BIOACTIVOS OBTENIDOS DE LOS SUBPRODUCTOS, EN PRODUCTOS CÁRNICOS

Antioxidantes

La adición de antioxidantes en los alimentos es un método eficaz para inhibir o retrasar la oxidación de lípidos, así como para minimizar la formación de compuestos tóxicos como los productos de oxidación del colesterol, mejoran-

do así la vida útil de los productos. En este sentido, el uso de aditivos naturales, se ha incrementado notablemente por su seguridad y efectos positivos para la salud [3].

En la Tabla 1, se muestran varios estudios que reportan el uso de residuos agroindustriales como fuente de antioxidantes, los resultados muestran una mayor inhibición de los procesos de oxidación en comparación con el uso de antioxidantes sintéticos o un solo antioxidante.

Tabla 1. Efecto antioxidante de subproductos agroindustriales en productos cárnicos.

Producto cárnico	Subproducto utilizado	Resultados	Referencia
Empanadas de cerdo cocidas	Extracto de cáscara de cebolla (ECC)	Las empanadas tratadas con ECC mostraron una actividad antioxidante y un contenido total de polifenoles significativamente más altos que el control. Después de 5 días en refrigeración los valores en oxidación de grasas también fueron menores que el control.	[11]
Hamburguesas de res		La aplicación de ECC tuvo una mayor inhibición de la oxidación lipídica, en comparación con el antioxidante sintético Butilhidroxitolueno (BHT) después de 15 días en refrigeración.	[12]
Hamburguesas de pollo cocidas	Polvo de cáscara de granada (PCG)	El tratamiento con PCG inhibió la oxidación de lípidos aún más que el tratamiento con BHT, hasta el día 16 de almacenamiento en refrigeración.	[13]
Albóndigas de res		Después de 8 días en refrigeración la oxidación lipídica y proteica fue incluso más baja en el tratamiento con cáscara de granada que un antioxidante sintético, bastante utilizado en la industria. En condiciones de congelamiento (-18±1 °C) el almacenamiento logro prolongarse hasta por 6 meses.	[14], [15]
Hamburguesas de res	Extracto de cáscara de aguacate (ECA)	Se evitó la oxidación de proteínas y lípidos, en hamburguesas cocidas, hasta por 10 días. Resultados atribuidos, al alto contenido de polifenoles presentes en la cáscara de aguacate.	[16]
Carne molida de res	Polvos secos y extractos de Ciruela (PSEC). Pure de manzana (PM).	Estos residuos proporcionaron niveles de hasta 10 mg de compuestos fenólicos por cada 100 g de carne. Presentando efectos antioxidantes significativos con un efecto negativo, leve o nulo en sus características sensoriales.	[5]
Salchichas de cerdo	Extracto de hoja de guayaba (EHG)	Al ser una fuente rica de fibra dietética antioxidante (FDA), se inhibió la oxidación de lípidos durante 14 días a ° C, al contrario que las muestras de control (sin extracto y con BHT)	[17]

Antimicrobianos

De igual forma, se ha estudiado el efecto de residuos agroindustriales sobre la inhibición del crecimiento bacteriano. Por ejemplo, se han agregado extractos de cáscara de granada a carne de pollo, presentando una inhibición natural de diversas bacterias patógenas, como *Listeria monocytogenes*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*. Los resultados muestran una buena actividad antimicrobiana, lo que permitió el aumento de la vida útil hasta en dos semanas, en dichos productos [18]. Este efecto antimicrobiano, ha sido asociado al contenido de compuestos fenólicos como son el ácido gálico y ácido elágico de este residuo, así como a otros flavonoides [9].

Otro estudio mostró que la incorporación de extracto de semilla de uva en carne de cerdo cruda disminuyó bacterias patógenas, como *L. monocytogenes*, *S. aureus* y *Salmonella enterica*, durante 9 días de almacenamiento a temperatura ambiente. Lo relevante de este estudio, fue descubrir que los subproductos son capaces de extender la fase de retraso del crecimiento microbiano, reduciendo los cambios de pH, lo que a su vez, no permite el crecimiento o desarrollo óptimo de los microorganismos [9].

Además, los alimentos ricos en compuestos de azufre, como es la cáscara de cebolla, ha mostrado tener ciertos efectos bactericidas y bacteriostáticos contra algunos microorganismos patógenos como *B. cereus*, *S. aureus*, *Micrococcus luteus* y *L. monocytogenes* [19].

Parafati et al. (2019) aplicaron extracto acuoso de pulpa de las variedades de tuna morada y roja en hamburguesas de res, comparando la adición directa del extracto y la versión encapsulada. Los análisis microbiológicos realizados después de 8 días de almacenamiento en frío (4 °C) mostraron el efecto conservador en hamburguesas con extracto de tuna adicionado, el cual redujo significativamente el recuento de bacterias mesófilas, *Enterobacteriaceae* y *Pseudomonas* sp., cuando se comparó con la muestra control. Los autores concluyeron que la aplicación del extracto, encapsulado o no, es un método efectivo para la conservación de hamburguesas de res.

Jugosidad, dureza y rendimiento por cocción

El tipo y la calidad de grasa son muy importantes para la textura y los atributos sensoriales de los productos cárnicos, ya que tienen un papel importante en la apariencia, la ternura, el sabor, la jugosidad, la dureza y la vida útil del producto [9].

Con relación al aspecto o la forma, la reducción de grasa resulta en la desestabilización de las emulsiones cárnicas, ya que actúa como un espaciador entre las redes tridimensionales de las proteínas [9]. Algunos ingredientes que reemplazan el contenido de grasa funcionan como sustitutos de grasa y otros como imitadores de ella. Los primeros tienen estructuras similares a las grasas, principalmente ácidos grasos, y suelen ser sustituidos en el mismo porcentaje que el producto original. Los segundos,



presentan funcionalidades comparables a las de las grasas, principalmente sensoriales y físicas, y no son sustituidas en proporciones iguales [9].

Durante el procesamiento de la carne, las fibras dietéticas (FD) se unen al agua y la grasa para dar una emulsión muy estable que mejora el rendimiento de cocción, la capacidad de retención de agua y la jugosidad. Por lo que la estabilidad de la emulsión, está muy relacionada a una menor pérdida por cocción de los productos cárnicos, o que resulta ventajoso no sólo desde el punto de vista tecnológico sino también económico [4].

Esto ha llevado a los investigadores y procesadores de alimentos, a incorporar FD en diferentes formulaciones, como sustituto de la grasa para elaborar productos bajos en grasa, por las propiedades funcionales que ofrece como unión a grasas y capacidad gelificante en productos cárnicos [4].

Debido a los beneficios anteriores, se han realizado extensos estudios para incorporar diferentes ingredientes ricos en fibra, como fibra de avena, fibra de durazno, pulpa de manzana, pulpa de calabaza, harina de cáscara de garbanzo, fibra de piña, pulpa de zanahoria, fibra de cítricos, por nombrar algunos [4], [5].

La mayoría de los residuos agroindustriales tienen un alto contenido de fibra, un ejemplo es el orujo de tomate, que contiene 25-50 % de fibra, además de proteínas (15-24 %), lípidos (5-21 %) y minerales (4-7 %) [9].

Funciones nutricionales- Calidad nutricional

Se ha descubierto que algunos antioxidantes/antimicrobianos naturales no solo pueden extender la vida útil de los productos alimenticios, sino que también son beneficiosos como medicina preventiva contra diversas enfermedades humanas [20].

Como se muestra en la Tabla 2, algunos compuestos fenólicos, además de tener propiedades antioxidantes, tienen efectos beneficiosos para la salud al ser terapéuticos y reducir los efectos secundarios de enfermedades que involucran estrés oxidativo [3], [9].

Tabla 2. Propiedades benéficas a la salud de compuestos bioactivos presentes en subproductos.

Subproducto	Compuestos bioactivos	Aplicación	Efecto beneficioso a la salud	Referencia
Cáscara de granada, naranja, mango, piña, mandarina, uva y cebollas.	Compuestos fenólicos (ácido gálico, ácido elágico y otros flavonoides)	Hamburguesas de res y pollo, carne molida de res y puerco.	Antioxidante, reducción de los efectos secundarios de enfermedades como diabetes, obesidad, enfermedades cardiovasculares, procesos inflamatorios, cáncer, entre otras.	[3], [9]
Residuos de zanahoria	β -caroteno, hierro, fibra dietética (FD), vitaminas y minerales.	Pechugas de carne de pollo	Anti mutagénico, antitumoral y antiulceroso	[21]
Piel de jitomate	Licopeno (carotenoide)	Salchichas de res	Disminución del riesgo de cáncer de próstata y enfermedades cardiovasculares	[22], [23]
Cáscara del aguacate Hass	Carotenoides y compuestos fenólicos	Carne molida de res	Antioxidante, anticancerígeno y mutagénico.	[24]



En general, la adición de dichos compuestos a los productos cárnicos brinda un beneficio para la salud al hacer que los alimentos sean funcionales y mejoran su calidad nutricional al enriquecer los productos con vitaminas y minerales, así como fibra dietética antioxidante.

CONCLUSIÓN

Para enfrentar los desafíos y demandas cambiantes de ofrecer productos nutritivos que brinden beneficios para la salud y al mismo tiempo garanticen un sabor, textura y apariencia atractiva, la industria del procesamiento de la carne y la ciencia, buscan constantemente formas de agregar propiedades funcionales a los productos cárnicos. Los residuos agroindustriales, al ser una fuente amplia de compuestos fenólicos, fibras dietéticas, proteínas, entre otros,

pueden ofrecer un segundo uso en la industria cárnica, al funcionar como conservadores, texturizantes y colorantes, para mejorar aspectos sensoriales y como conservadores que puedan preservar las propiedades de calidad de los productos cárnicos, y por lo tanto, prolongar su vida útil.

En general, es posible observar su potencial como nuevos aditivos alimentarios, derivados de subproductos, para su aplicación en la industria alimentaria. Estos representan una solución de bajo costo y bajo impacto ambiental, capaz de brindar una alternativa para una industria que depende en gran medida de los compuestos sintéticos. Por lo que, el uso de subproductos como fuente de aditivos alimentarios se destaca como una opción económica y ambientalmente consciente que promoverá la nueva era de la economía circular.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FAO, The state of food security and nutrition in the world 2019: safeguarding against economic slowdowns and downturns. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2019).
- [2] N. A. Sagar, S. Pareek, S. Sharma, E. M. Yahia, and M. G. & Lobo, "Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17 (3), pp. 512–531, 2018, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>.
- [3] M. Faustino, M. Veiga, P. Sousa, E. M. Costa, S. Silva, and M. Pintado, "Agro-food byproducts as a new source of natural food additives," *Molecules*, vol. 24, no. 6, pp. 1–23, 2019, doi: [10.3390/molecules24061056](https://doi.org/10.3390/molecules24061056).
- [4] A. K. Das et al., "A comprehensive review on antioxidant dietary fibre enriched meat-based functional foods," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 99, no. September 2019, pp. 323–336, 2020, doi: [10.1016/j.tifs.2020.03.010](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.010).
- [5] K. Kumar, *Nutraceutical potential and utilization aspects of food industry by-products and wastes*. INC, 2020.
- [6] P. Selvakumar, P., & Sivashanmugam, "Studies on the extraction of polyphenolic compounds from pre-consumer organic solid waste," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 82, pp. 130–137, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.10.004>.



- [7] M. Araneda, "Carne y derivados. Composición y propiedades," *Edualimentaria*, 2022. <https://www.edualimentaria.com/carnes-cecinas-composicion-propiedades> (accessed Jul. 11, 2022).
- [8] FAO, "Carne y Productos Cárnicos," Departamento de Agricultura y Protección del Consumidor, Producción y Sanidad Animal, 2019. <https://www.fao.org/ag/againfo/themes/es/meat/home.html> (accessed Apr. 26, 2022).
- [9] M. Calderón-Oliver and L. H. López-Hernández, "Food Vegetable and Fruit Waste Used in Meat Products," *Food Rev. Int.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–27, 2020, doi: 10.1080/87559129.2020.1740732.
- [10] K. Bhardwaj et al., "Fruit and Vegetable Peel-Enriched Functional Foods: Potential Avenues and Health Perspectives," *Evidence-based Complement. Altern. Med.*, vol. 2022, no. Natural Products and Herbal Medicine: Safety, Efficacy, and Bioactivity, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8543881>.
- [11] J. Bedrníček et al., "Onion waste as a rich source of antioxidants for meat products," *Czech J. Food Sci.*, vol. 37, no. 4, pp. 268–275, 2019, doi: 10.17221/68/2018-CJFS.
- [12] H. S. Zaki, N. L., Abd-Elhak, N. A., & Abd El-Rahman, "The Utilization of Yellow and Red Onion Peels and Their Extracts as Antioxidant and Antimicrobial in Preservation of Beef Burger during Storage," *Am. J. Food Sci. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2022, doi: 10.12691/ajfst-10-1-1.
- [13] P. Sharma and S. Yadav, "Effect of Incorporation of Pomegranate Peel and Bagasse Powder and Their Extracts on Quality Characteristics of Chicken Meat Patties," *Food Sci. Anim. Resour.*, vol. 40, no. 3, pp. 388–400, 2020.
- [14] S. S. Turgut, A. Soyer, and F. Işıkçı, "Effect of pomegranate peel extract on lipid and protein oxidation in beef meatballs during refrigerated storage," *Meat Sci.*, vol. 116, pp. 126–132, 2016, doi: 10.1016/j.meatsci.2016.02.011.
- [15] S. S. Turgut, F. Işıkçı, and A. Soyer, "Antioxidant activity of pomegranate peel extract on lipid and protein oxidation in beef meatballs during frozen storage," *Meat Sci.*, vol. 129, pp. 111–119, 2017, doi: 10.1016/j.meatsci.2017.02.019.
- [16] J. M. Trujillo-Mayol, I., Sobral, M. M. C., Viegas, O., Cunha, S. C., Alarcón-Enos, J., Pinho, O., & Ferreira, "Incorporation of avocado peel extract to reduce cooking-induced hazards in beef and soy burgers: A clean label ingredient," *Food Res. Int.*, vol. 147, no. 110434, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110434>.
- [17] T. T. Tran, T. T. T., Ton, N. M. N., Nguyen, T. T., Sajeev, D.,

Schilling, M. W., & Dinh, "Application of natural antioxidant extract from guava leaves (*Psidium guajava* L.) in fresh pork sausage," *Meat Sci.*, vol. 165, p. 108106, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108106>.

- [18] M. Balaban, C. Koc, T. Sar, and M. Y. Akbas, "Antibiofilm effects of pomegranate peel extracts against *B. cereus*, *B. subtilis*, and *E. faecalis*," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 56, no. 10, pp. 4915–4924, 2021, doi: 10.1111/ijfs.15221.
- [19] D. Fredotović, Ž., Puizina, J., Nazlić, M., Maravić, A., Ljubenković, I., Soldo, B., ... & Bajić, "Phytochemical characterization and screening of antioxidant, antimicrobial and antiproliferative properties of *Allium× cornutum clementi* and two varieties of *Allium cepa* L. peel extracts," *Plants*, vol. 10, no. 5, p. 832, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/plants10050832>.
- [20] M. Aziz and S. Karboune, "Natural antimicrobial/antioxidant agents in meat and poultry products as well as fruits and vegetables: A review," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 58, no. 3, pp. 486–511, 2018, doi: 10.1080/10408398.2016.1194256.
- [21] D. López-Romero et al., Evidence of some natural products with antigenotoxic effects. Part 2: Plants, vegetables, and natural resin, vol. 10, no. 12. 2018.
- [22] J. So, S., Uriyapongson, S., & Uriyapongson, "Effects of dried tomato waste powder levels on lycopene content, lipid oxidation, color, antioxidant activity, and sensory properties of frankfurter sausage made from Thai native beef," *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 27–34, 2020, [Online]. Available: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/SONG/10993038.pdf>.
- [23] M. Ghafouri-Oskuei, H., Javadi, A., Asl, M. R. S., Azadmard-Damirchi, S., & Armin, "Quality properties of sausage incorporated with flaxseed and tomato powders," *Meat Sci.*, vol. 161, p. 107957, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107957>.
- [24] S. J. V. Vicente, G. R. Sampaio, C. K. B. Ferrari, and E. A. F. S. Torres, "Oxidation of Cholesterol in Foods and Its Importance for Human Health," *Food Rev. Int.*, vol. 28, no. 1, pp. 47–70, 2012, doi: 10.1080/87559129.2011.594972.

Cómo citar este artículo:

Ordaz, S. B., Abadía-García, L., Femat Díaz, A., & Mendoza Sánchez, M. (2022). APRENDIENDO A REVALORIZAR LOS SUBPRODUCTOS Y SU APLICACIÓN EN PRODUCTOS CÁRNICOS. *EPISTEMUS*, 16(33).
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.227>



Radiosensibilidad en cáncer de mama asociado al origen étnico

Radiosensitivity in breast cancer associated with ethnicity

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Aracely Angulo-Molina¹

Efraín Urrutia Bañuelos²

Erika Silva-Campa³

Karla Santacruz-Gómez⁴

Monica Acosta-Elías⁵

Recibido: 19 / 04 / 2022

Aceptado: 28 / 06 / 2022

Publicado: 10 / 08 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.224>

Autor de Correspondencia:

Monica Alessandra Acosta Elías

Correo: monica.acosta@unison.mx

Resumen

Estudios científicos han demostrado que la etnicidad tiene un gran impacto en la incidencia del cáncer, la supervivencia y la respuesta a los medicamentos. Dentro de los tratamientos más comunes para el cáncer de mama se encuentra la extirpación tumoral, la cual va de la mano con la radioterapia por su eficacia en destruir células cancerosas residuales. Sin embargo, se ha observado que la respuesta a la radiación es heterogénea entre pacientes y subtipos de cáncer de mama, observándose diferentes efectos adversos que pudieran estar asociados a la etnicidad. Sin embargo, en investigación se utilizan líneas celulares de origen caucásico y afroamericano, por lo que se considera la necesidad de nuevas líneas celulares de origen latinas y/o asiáticas. En esta revisión se expone la necesidad de evaluar y comparar los efectos de la radiosensibilidad usando modelos con diferente origen étnico para potencialmente aplicar la radioterapia personalizada según la etnicidad.

Palabras clave: cáncer de mama, radioterapia, etnicidad, radiosensibilidad.

Abstract

Scientific studies have shown that ethnicity has a great impact on cancer incidence, survival and response to drugs. Among the most common treatments for breast cancer is tumor removal, which goes hand in hand with radiation therapy for its efficacy in destroying residual cancer cells. However, it has been observed that the response to radiation is heterogeneous among patients and subtypes of breast cancer, with different adverse effects that may be associated with ethnicity. Cell lines of Caucasian and African-American origin are used in research, therefore the need for new cell lines of Latino and/or Asian origin is considered. In this review, we show the need to evaluate and compare the effects of radiosensitivity using models with different ethnicity in order to potentially apply personalized radiotherapy according to ethnicity is discussed.

Keywords: radiotherapy, breast cancer, ethnicity, radiosensitivity.

¹ Dra. Angulo-Molina A, Departamento de Ciencias Químico Biológicas y de la Salud, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, aracely.angulo@unison.mx, 0000-0002-8586-3387

² Dr. Urrutia-Bañuelos E, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, efrain.urrutia@unison.mx, 0000-0003-2672-1191

³ Dra. Silva Campa E, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, erika.silva@unison.mx, 0000-0001-6019-858X

⁴ Dra. Santacruz-Gómez K, Departamento de Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, karla.santacruz@unison.mx, 0000-0002-5387-6482

⁵ Dra. Acosta-Elías M, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, monica.acosta@unison.mx, 0000-0003-0954-3581



INTRODUCCIÓN

El cáncer de mama (CM) es una de las neoplasias más comunes a nivel mundial, con la mayor tasa de mortalidad en mujeres de países en vías de desarrollo. El incremento de mortalidad está asociado a una mayor incidencia de la enfermedad y el aumento de la esperanza de vida. Según la Organización Mundial de la Salud, cada año se detectan 1.38 millones de casos nuevos y llegan a morir hasta 458 mil mujeres por esta enfermedad. [1] Dentro de los tratamientos más comunes para el cáncer de mama se encuentra la extirpación tumoral, la cual va de la mano con la radioterapia por su eficacia en destruir células cancerosas residuales.

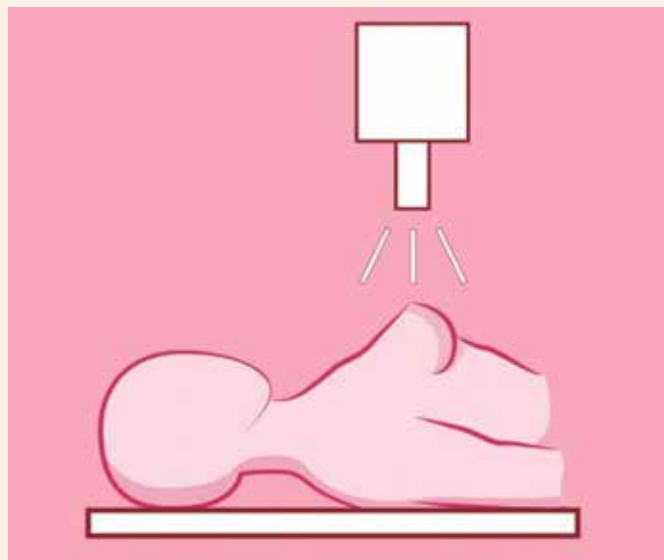


Figura 1. Radioterapia en cáncer de mama. [2]

Sin embargo, se ha observado que la respuesta a la radiación y la radiosensibilidad es heterogénea entre pacientes, etnicidad y subtipos de cáncer de mama. [3,4] La radiosensibilidad es el efecto tumoral inducido por la irradiación que puede medirse por la extensión de la regresión tumoral, la rapidez de la respuesta antitumoral o la duración de tal respuesta. [5]

Actualmente existe un interés de conocer los mecanismos que conducen a las respuestas de los tratamien-



tos, así como de los efectos adversos que se observan en los diferentes grupos étnicos. Sin embargo, actualmente los estudios de CM enfocados en la selección de fármacos diana terapéuticos se realizan en líneas celulares de origen caucásicas o afroamericanas como lo son MCF-7, MDA-MB-231, T-47D y MDA-MB-468. [6] El uso de estas líneas celulares no es representativo de todas las características distintivas de los diferentes grupos étnicos o poblaciones. Esto crea un problema sobre la representación de las pocas líneas celulares, en contraste con la diversidad de la población mundial. [7,8] Recientemente se ha observado que el origen étnico impacta en las diferencias en el pronóstico, agresividad y mortalidad. Esto indica que existe la necesidad de una mejor interpretación de los resultados experimentales en el diagnóstico y de caracterización. [9] En ese sentido muchos grupos étnicos no están representados, por lo que la información de los efectos benéficos y/o adversos de la radioterapia sigue siendo un reto. Por ello, en esta revisión se expone la importancia de estudiar y promover la radioterapia personalizada en cáncer de mama considerando la etnicidad.

Cáncer de Mama en México

En México, el CM representa la primera causa de muerte por cáncer en mujeres. [1,10] El CM tiene una incidencia que pasa de 14.30 (por cada 100 mil mujeres de 24 a 44 años) a 51.98 (en las del grupo de 45 a 49 años). En el año





2020 el riesgo de padecer CM alcanzó a 1 de cada 3 mujeres mexicanas mayores de 25 años. Las entidades con mayor mortalidad por CM son: Sonora (28.6), Nuevo León (26), Coahuila (25.7), Chihuahua (24.8), Cd. México (24.7) y Sinaloa (22.2), las tasas de mortalidad son por cada 100 mil mujeres. En la Fig. 2 se muestra la incidencia para CM en las entidades federativas de la República Mexicana para mujeres mayores de 20 años. El estado de Sonora se encuentra entre los primeros lugares de incidencia y mortalidad. [10]



Figura 2. Incidencia de Cáncer de mama en mujeres de 20 años y más. Proyección 2010-2050. [7]

Los factores de riesgo para cáncer de mama en México se han asociado con la reproducción, la edad de la me-

narca, edad de la menopausia, edad del primer embarazo, número de embarazos, uso de anticonceptivos y terapia hormonal, así como la práctica de la lactancia materna. Algunos estudios han demostrado la relación de estos factores con neoplasias, así como el efecto por el uso de anticonceptivos hormonales y de la terapia hormonal sobre el riesgo de padecer CM. [11]

En los últimos años ha crecido el interés por estudiar la variabilidad de incidencia y mortalidad entre distintas razas étnicas, lo que ha llevado a la necesidad de caracterizar cada población, incluyendo aspectos genéticos, farmacogenómicos y de radiosensibilidad. Esta última es de particular interés, dado que en CM es una de las terapias más utilizadas.

Cáncer de Mama y origen étnico.

Recientemente se reportaron en Estados Unidos las tasas de incidencia y mortalidad por cada 100,000 individuos, separando por sexo, tipo de cáncer y etnicidad (Tabla 1). Las mujeres afroamericanas no hispanas ocuparon el primer lugar de mortalidad y el segundo lugar de incidencia considerando todos los tipos de cáncer. Para CM en particular, las mujeres afroamericanas también mostraron la tasa más alta de mortalidad, seguidas de las mujeres blancas no hispanas. Las mujeres asiáticas actualmente representan el grupo étnico de menor incidencia y mortalidad para CM. [12,13] Por su parte, las latinas ocuparon el cuarto lugar en incidencia y mortalidad dentro de los 5 grupos étnicos estudiados, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Tasa de incidencia y mortalidad de cáncer en mujeres (EUA, 2012-2017)

2012-2017	Blancas no hispanas	Afro-americanas no hispanas	Asiáticas	Nativas americanas y nativas de Alaska	Latinas
Incidencia de cáncer	440.7	407.2	289.5	370.9	333.4
Incidencia en Cáncer de mama	130.8	126.7	93.3	94.7	93.9
Mortalidad de cáncer	139.9	157.5	85.0	122.9	95.1
Mortalidad Cáncer de mama	20.3	28.4	11.4	14.6	14.0

Tasas por cada 100,000 habitantes.

Adaptado de American Cancer Society, 2020 [12] y NCI, 2021 [13]

Por otra parte, algunos estudios sugieren la participación de factores hormonales en las respuestas a los tratamientos tanto farmacológicos como de radioterapia. Fármacos anti estrogénicos como el tamoxifeno bloquean la unión del estrógeno a la célula tumoral, inhibiendo de esta forma el desarrollo de las células cancerosas. [14] Esto es importante si consideramos que los tumores de CM se pueden clasificar por la presencia o ausencia de receptores estrogénicos. Por ejemplo, se han observado diferencias en la prevalencia de tumores de CM positivos a receptores de estrógenos, donde las mujeres afroamericanas y las hispanas presentan valores más bajos que las mujeres blancas. [15]

Esto puede explicar parcialmente las diferencias étnicas y/o raciales relacionadas al uso del tamoxifeno y las respuestas observadas en estas mujeres. Por ejemplo, se ha observado que en pacientes afroamericanas con comorbilidades cardiovasculares y que usan tamoxifeno se les incrementa el riesgo a reacciones adversas como la embolia pulmonar y trombosis de venas profundas, entre otros. [14]

Actualmente, varios grupos de investigación están rea-

lizando estudios sobre las variaciones genéticas asociadas a la sensibilidad y/o resistencia a fármacos antitumorales basados en el mapeo de moléculas y la respuesta celular [4,16]. Además, se están estudiando los perfiles farmacológicos basados en la variación de un sólo nucleótido, la amplificación en el número de copias y la variación estructural principalmente. [16] Estas variaciones se utilizarán en un futuro como biomarcadores para predecir la respuesta clínica personalizada a los diferentes tratamientos.

Un reto emergente es el estudio de agentes terapéuticos y de diagnóstico, algunas investigaciones han observado diferencias en la respuesta al tratamiento, según el origen étnico, [3,4] los cuales generalmente se realizan en líneas celulares de origen afroamericano o caucásico [6] por lo que estos modelos están limitados al no incluir líneas celulares derivadas de otros grupos. En farmacogenética, conocer la frecuencia de variantes propias de una población permiten encontrar patrones específicos para la aplicación de tratamientos personalizado para CM, evitando así los efectos adversos ocasionados por toxicidad fuera de la célula blanco. [17]





Recientemente varios estudios proponen evaluar el cribado sistemático de fármacos antitumorales de células derivadas de tumores de pacientes, en lugar de usar las líneas celulares típicas de laboratorio. La idea es evaluar la presencia o ausencia de marcadores moleculares predictivos de respuesta “gen/fármaco” en líneas celulares tumorales generadas directamente de los tumores de los pacientes, sobre todo considerando que los modelos convencionales no han demostrado datos genómicos precisos asociados a una aplicación clínica exitosa. El tratamiento de precisión basado en la farmacogenética sería la meta final. [17]

Radiosensibilidad asociada al origen étnico.

La radiación ionizante se utiliza como una alternativa al tratamiento del CM, ya que las células cancerosas que proliferan con mayor rapidez son más sensibles a la radiación en comparación con las células sanas. Dentro de los tratamientos más comunes para el CM se encuentra la extirpación tumoral, sin embargo, va de la mano con la radioterapia por su eficacia en destruir células cancerosas residuales. Dentro de los efectos de la radioterapia a nivel celular se encuentran: el daño al ADN, a la membrana lipídica y al citoplasma o a través de la generación de radicales libres, los cuales inducen un daño oxidativo y finalmente la muerte. [18] Actualmente, para el estudio de la radioterapia y radio sensibilización se utilizan modelos generales sin considerar entre las razas étnicas, ni aspectos radio farmacogenéticos del CM. [3,4,19]

El estudio de agentes terapéuticos y de diagnóstico generalmente se realiza en líneas celulares de origen

afroamericano o caucásico. Sin embargo, los estudios sobre la variabilidad en la incidencia y la mortalidad por este padecimiento entre distintos grupos étnicos ponen en evidencia la necesidad de caracterizar a cada población de una forma más detallada. Dado que algunas investigaciones han observado diferencias en la respuesta al tratamiento incluyendo la radiosensibilidad, según el origen étnico, se puede decir que estos modelos están limitados. [19] Por lo que se requiere mayor investigación al respecto.



Figura 3. Etnicidad en cáncer de mama. [20]

COMENTARIOS FINALES

Con el fin de minimizar los efectos adversos de la radiación, la radioterapia personalizada, considerando las diferencias étnicas puede ser de utilidad para optimizar las dosis de exposición y prevenir reacciones adversas. Investigaciones recientes han demostrado que la respuesta biológica de células tumorales humanas expuestas a dosis terapéuticas de radiación depende de su origen. Las diferencias encontradas entre líneas celulares confirman el importante papel de la radioterapia personalizada, ya que la evaluación de factores intrínsecos y extrínsecos del tumor son necesarios para optimizar las dosis de radiación.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Health Assembly. Fifty-eighth World Health Assembly, Geneva, 16-25 May 2005.
- [2] Abigail Libers (2018, Octubre 10), "Every Type of Breast Cancer Treatment Explained", www.prevention.com/health/health-conditions/a23693371/breast-cancer-treatments
- [3] Villalobos M, Becerra D, Núñez MI, Valenzuela MT, Siles E, Olea N, Pedraza V, Ruiz de Almodóvar JM. Radiosensitivity of human breast cancer cell lines of different hormonal responsiveness. Modulatory effects of oestradiol. *Int J Radiat Biol.* 70(2):161-9, 1996, doi: 10.1080/095530096145157.
- [4] Auer J, Keller U, Schmidt M, Ott O, Fietkau R, Distel LV. Individual radiosensitivity in a breast cancer collective is changed with the patients' age. *Radiol Oncol.* 48(1):80-6. 2014 Jan 22, doi: 10.2478/raon-2013-0061.
- [5] Winn, H. Richard, MD Fractionated, *Neurological Surgery*, Elsevier <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09780323049719000275> Vol 4 No. 8, 2017
- [6] Lefley, D., Howard, F., Arshad, F., Bradbury, S., Brown, H., Tulotta, C., Ottewell, P. Development of clinically relevant in vivo metastasis models using human bone discs and breast cancer patient-derived xenografts. *Breast Cancer Research*, 21(1), 130. (2019). doi:10.1186/s13058-019-1220-2
- [7] Guerrero S, López-Cortés A, Indacochea A, García-Cárdenas JM, Zambrano AK, Cabrera-Andrade A, Guevara-Ramírez P, González DA, Leone PE, Paz-Y-Miño C. Analysis of Racial/Ethnic Representation in Select Basic and Applied Cancer Research Studies. *Sci Rep.* 8(1):13978. 2018 Sep 18, doi: 10.1038/s41598-018-32264-x.
- [8] Dai X, Cheng H, Bai Z, Li J. Breast Cancer Cell Line Classification and Its Relevance with Breast Tumor Subtyping. *J Cancer* ;8(16):3131-3141. 2017 Sep 12 doi: 10.7150/jca.18457.
- [9] Januszewski A, Tanna N, Stebbing J. Ethnic variation in breast cancer incidence and outcomes--the debate continues. *Br J Cancer.* 110(1):4-6. 2014 Jan 7, doi: 10.1038/bjc.2013.775.
- [10] INEGI (2020, Octubre 19) "ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA MUNDIAL DE LA LUCHA CONTRA EL CÁNCER DE MAMA" <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=5996>
- [11] Navarro, M.J., Caire, G., Ortega, M.I., Bolaños, A.V., Saucedo M.S. "Influencia de los factores reproductivos, la lactancia materna y la obesidad sobre el riesgo de cancer de mama en mujeres mexicanas". *Revista Nutricion Hospitalaria*, Vol. 32, No. 1, pp. 291-298. 2015

- [12] ACS. 2020. Disponible en: <https://www.cancer.org/content/dam/cancer-org/research/cancer-facts-and-statistics/annual-cancer-facts-and-figures/2020/incidence-and-mortality-rates-race-and-ethnicity-2012-2017.pdf>
- [13] National Cancer Institute. "SEER Cancer Stat Facts: Female Breast Cancer", Disponible: <https://seer.cancer.gov/statfacts/html/breast.html> (National Cancer Institute. Bethesda, MD, 2021).
- [14] Shagufta, Ahmad I. Tamoxifen a pioneering drug: An update on the therapeutic potential of tamoxifen derivatives. *Eur J Med Chem.* 143:515-531, 2018 Jan 1, doi: 10.1016/j.ejmech.2017.11.056.
- [15] Zavala, V.A., Bracci, P.M., Carethers, J.M. et al. Cancer health disparities in racial/ethnic minorities in the United States. *Br J Cancer*, Vol 124, pp 315-332 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41416-020-01038-6>
- [16] Lee, J.K., Liu, Z., Sa, J.K. et al. "Pharmacogenomic landscape of patient-derived tumor cells informs precision oncology therapy", *Nat Genet* Vol. 50, pp 1399-1411, 2018, <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0209-6>.
- [17] Rashmi R. Shah and Andrea Gaedigk, "Precision medicine: does ethnicity information complement genotype-based prescribing decisions?", *Ther Adv Drug Saf* Vol. 9, No. 45, 2018, DOI: 10.1177/2042098617743393
- [18] Kamat JP, Devasagayam TP, Priyadarsini KI, Mohan H, "Reactive oxygen species mediated membrane damage induced by fullerene derivatives and its possible biological implications" *Toxicology*, Vol. 155 No.1-3, pp 55-61, 2000, DOI: 10.1016/S0300-483X(00)00277-8
- [19] Samantha J. Harder, Quinn Matthews, Martin Isabelle, Alexandre G. Brolo, Julian J. Lum, and Andrew Jirasek, "A Raman Spectroscopic Study of Cell Response to Clinical Doses of Ionizing Radiation", *Applied Spectroscopy* Vol 69, No.2, pp 193, 2015. <https://doi.org/10.1366/14-07561>
- [20] Disponible en: <https://unsplash.com/s/photos/cancer>.

Cómo citar este artículo:

Angulo Molina, A., Urrutia Bañuelos, E., Silva Campa, E., Santacruz Gómez, K., & Acosta Elías, M. A. (2022). Radiosensibilidad en cáncer de mama asociado al origen étnico. *EPISTEMUS*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.224>



Árboles de decisión para clasificación de vacas lecheras usando información genética

Decision tree to classification of dairy cows from genetic information

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Edelmira Rodríguez Alcántar¹

Recibido: 17 / 01 / 2022

Aceptado: 20 / 07 / 2022

Publicado: 24 / 08 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.220>

Autor de Correspondencia:

Edelmira Rodríguez Alcántar

Correo: edelmira.rodriguez@unison.mx

Resumen

En este trabajo se presenta a los árboles de decisión como una técnica de aprendizaje automático para la clasificación de vacas como buenas productoras de leche a partir del uso de marcadores genéticos. La finalidad es realizar una selección de animales genéticamente superiores en menor tiempo y hacer más eficiente el proceso de reproducción asistida logrando con ello disminuir costos y aumentar ganancias en el sector lechero.

Los resultados de los experimentos realizados muestran hasta un 94.5% de precisión. Además, el algoritmo permitió la identificación del SNP más dominante para la clasificación, y el cromosoma que más influye en la predicción.

Palabras clave: clasificación, árboles de decisión, producción lechera.

Abstract

This paper presents decision trees as a machine learning technique for classifying cows as good milk producers or not, based on the use of genetic markers. The purpose is to select genetically superior animals in less time and make the assisted reproduction process more efficient, thereby reducing costs and increasing profits in the dairy sector. Results are presented on the efficiency of decision trees for the classification of dairy cows, up to 94.5% accuracy was achieved. In addition, the algorithm allowed the identification of the most dominant SNP for classification, and the chromosome that most influences the prediction.

Keywords: classification, decision trees, dairy production.

¹ Dra. Rodríguez Alcántar E., Departamento de matemáticas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, <https://orcid.org/0000-0003-1825-102X>

INTRODUCCIÓN

Producción lechera en México

Según las estadísticas de la Cámara Nacional de Industriales de la Leche [1], actualizadas al mes de abril del 2021, México ocupa el 16° lugar como productor de leche con un 2% de la producción mundial. En la Figura 1 se ilustra esta información, para dar una mejor idea de la proporción que esto representa. La leche de bovino representa el 17% de la producción pecuaria nacional.

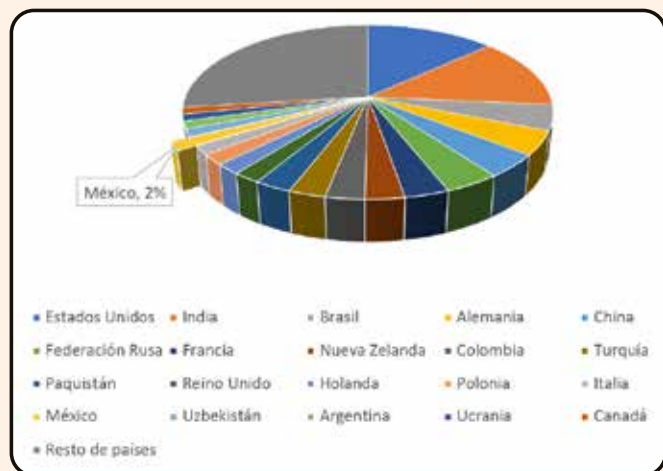


Figura 1. Principales países productores de leche de bovino, 2021.

Sin embargo, la producción nacional no es suficiente para satisfacer la demanda, pues, por ejemplo, en el 2020 se importaron productos lácteos por 1749 mdd desde EUA, de donde provino el 81% de las importaciones ese año. De hecho, la balanza comercial es notablemente desfavorable, importando productos lácteos en una cantidad aprox. 3.4 veces mayor de lo que se exporta en el país (2020). Como puede notarse, la producción lechera en México tiene una oportunidad de crecimiento importante al pretender cubrir el déficit de producción nacional o, incluso, aumentar las exportaciones. Para ello, un punto clave puede ser optimizar las técnicas empleadas en la selección de

las vacas que se destinarán a la producción lechera, debido a que se requiere esperar tres años para evaluar si una vaca es buena productora de leche. Al utilizar información genética la evaluación del fenotipo lechero puede ser más rápida y barata, pues no se estaría invirtiendo en la crianza de una vaca que no sea buena productora.

Genotipo y fenotipo

La genética está dedicada al estudio de las características hereditarias. Entre los temas básicos que se abordan en esta disciplina se encuentran el concepto de genotipo y de fenotipo. El genotipo es la información genética que posee un organismo en su ADN. Es decir, es información heredada de los padres. Los rasgos observables que caracterizan a un organismo constituyen su fenotipo (por ejemplo, la forma de los ojos, el largo de las orejas y el color del pelaje).

Marcadores genéticos

En Biotecnología, un “marcador molecular” es un fragmento de ADN en asociación con una cierta locación en el genoma (puede ser llamado también “marcador genético” o simplemente “marcador”); un marcador es usado para identificar una secuencia de ADN parcial en un grupo de ADN desconocido. Los Polimorfismos de Nucleótido Simple (Single Nucleotide Polymorphisms, SNP) son un tipo de marcadores muy utilizados que, aunque por sí solos no proporcionan información sobre genes específicos, indican una localización cromosómica con probabilidades de estar asociada con un fenotipo dado. En diciembre de 2007, se liberó el chip BovineSNP50 BeadChip para análisis de DNA, con 54001 SNPs y en el 2009 se empezó a usar oficialmente para la selección genética en la industria lechera de Estados Unidos [2].

Estudio de asociación de genoma completo

Un estudio de asociación de genoma completo (Genome-wide Association Study, GWAS), es un estudio de asociación del genoma con un fenotipo en particular. Los GWAS permiten utilizar un gran número de marcadores genéticos a lo largo de todo el genoma para detectar varia-





ciones asociadas con una enfermedad o rasgo particular. Un GWAS permite a los investigadores analizar individuos sin conocer su pedigrí [3].

Aunque los SNPs pueden no ser ellos mismos responsables de la variación observada en un rasgo, debido a su proximidad a las variantes causales no genotípicas, han sido heredados conjuntamente y, por lo tanto, pueden actuar como representantes de las variantes causales desconocidas. De esta manera, los SNPs asociados significativamente con una enfermedad o rasgo pueden indicar una región del genoma que alberga variantes genéticas que influyen en la expresión de esa enfermedad o rasgo.

Se han desarrollado nuevos valores de crianza estimada basados en los marcadores SNPs densos (Genomic Estimated Breeding Values, GEBV) cubriendo el genoma bovino completo, capturando así todos los locus de un carácter cuantitativo (Quantitative Trait Loci, QTL) que contribuyen a la variación de un rasgo, dando lugar al nuevo campo llamado Selección Genética (Genetic Selection, GS) [4]. La principal limitación para la implementación de selección genómica ha sido el gran número de marcadores requeridos y el costo de genotipado de estos marcadores [5].

En este trabajo, se utilizan árboles de decisión, una estrategia de Aprendizaje Automático (Machine Learning, ML), para predecir si una vaca será alta-productora de leche a partir de su información genética.

Aprendizaje automático

El análisis de grandes datos genómicos se ve obstaculizado por problemas como un pequeño número de observaciones y un gran número de variables predictivas, alta dimensionalidad o estructuras de datos altamente correlacionadas. Los métodos de aprendizaje automático son famosos por tratar estos problemas [6].

ML es un área de Inteligencia Artificial basada en la idea de que los sistemas informáticos pueden aprender mediante el análisis de datos en la búsqueda de patrones para generar un modelo capaz de hacer predicciones. Un problema de aprendizaje puede definirse como el problema de mejorar alguna medida de rendimiento, a través del entrenamiento, al realizar una tarea [7]. ML tiene dos categorías principales: métodos de aprendizaje supervisado

dos [8] y métodos de aprendizaje no supervisados [9]. Los métodos supervisados se entrenan con ejemplos etiquetados y luego se usan el modelo entrenado para hacer predicciones sobre ejemplos no etiquetados, mientras que los métodos no supervisados encuentran la estructura en un conjunto de datos sin usar etiquetas. El aprendizaje puede usarse para predecir datos categóricos (lo que se denomina predicción categórica o clasificación) o para predecir datos de valores reales, lo que se denomina regresión.

El objetivo general en este trabajo es demostrar el potencial del aprendizaje automático, en particular de los árboles de decisión, como un marco poderoso para el análisis genético que puede permitir realizar predicciones sobre la producción lechera de ganado bovino raza Holstein, partiendo de marcadores SNP a lo largo del genoma completo.

DESARROLLO

Conjunto de datos utilizado

El conjunto de datos usado en este trabajo fue obtenido de Chen et al. [10]. Los datos consisten en muestras genotípicas de 1092 vacas Holstein, en un panel de 164312 SNPs con 29 cromosomas autosomales. Los valores de los genotipos son 0, 1 y 2 para representar homocigotos de alelo menor, heterocigotos y homocigotos de alelo mayor, respectivamente. Se cuenta con medidas de fenotipos para diferentes rasgos y se seleccionó la producción lechera promedio a 305 días ('milk_le_ave_305').

Los cromosomas en el dataset están etiquetados como chr1, chr2, ..., chr29; para realizar el análisis se seleccionan aquellos cromosomas que contienen el número más significativo de QTLs relacionados con la producción lechera, según la base de datos Cattle QTLdb. En la Tabla 1 se presenta, para cada cromosoma, el número de QTLs relacionado con la producción lechera y el número de SNPs muestreados en el dataset.

Nótese que el cromosoma 14 resalta del resto debido a su número de QTLs asociados con la producción lechera. Los cromosomas con un mayor número de QTLs relacionados con la producción lechera son: chr1, chr5, chr6, chr14, chr17, chr20 y chr26. Estos son los cromosomas seleccionados para formar los subconjuntos con los que se harán las pruebas.



Tabla 1. Número de QTLs relacionados con la producción lechera y número de SNPs, por cromosoma.

Chr	Número de QTLs	Número de SNPs	Chr	Número de QTLs	Número de SNPs
1	23	7338	16	10	5269
2	16	7049	17	22	4750
3	21	8064	18	10	7579
4	12	7572	19	16	6108
5	31	7733	20	25	3395
6	36	5312	21	20	5871
7	18	7465	22	5	3765
8	8	6088	23	18	4548
9	10	5273	24	1	3622
10	14	5952	25	6	5773
11	7	7120	26	22	3536
12	8	6640	27	8	3492
13	13	6736	28	7	3680
14	51	4004	29	9	5004
15	4	5574			

Como estrategia de control de calidad (Quality Control, QC), se aplicaron ciertos filtros al dataset para asegurar la calidad general de las muestras y que se trata de un conjunto consistente de genotipos. El filtrado incluye remover:

1. Todas aquellas muestras que tengan >20% de genotipos faltantes.
2. Todos aquellos SNPs que violen la distribución de frecuencias de Hardy-Weinberg, como se aplica en [11].
3. Todos aquellos SNPs que tienen una frecuencia del alelo menor (MAF) <5%, por considerarse de variación no significativa.

Especificaciones de Hardware y software

Se utilizó un cluster de computadoras que usa el sistema operativo Linux CentOS 6.7, con un i5-2500 Quad-Core, procesador a 3.30 GHz, 4 GB RAM DDR3 1333 MHz.

El lenguaje de programación utilizado es Python (v.3.6.8) y la librería scikit-learn, con herramientas simples y eficientes para el aprendizaje automático.

Evitar sobreajuste

Suponer que se tiene un conjunto de datos compuesto por (X, y) donde X es la matriz de los genotipos (atributos) de tamaño $(nMuestras, nAtributos)$ y y es el vector donde se tiene el fenotipo esperado de cada muestra, de tamaño $nMuestras$.

Un error común al entrenar una función de aprendizaje es usar los mismos datos para el entrenamiento y para las pruebas pues se tendrá un desempeño perfecto, ya que se conocen todas las muestras. Esto se conoce como sobreajuste. Para evitarlo, se reserva una parte de los datos como un conjunto de pruebas, al que llamamos (X_{test}, y_{test}) . El resto de los datos se utiliza para el entrenamiento, lo llama-

mos (X_{train}, y_{train}) . Python tiene una función para separar al conjunto de datos en entrenamiento/prueba, llamada `train_test_split()`. Se utilizó esta función designando un 10% de las muestras para la etapa de pruebas y 90% para el entrenamiento.

RESULTADOS

El fenotipo utilizado es la producción promedio de leche a 305 días ('milk_le_ave_305'), con un rango de valores $[-8.576, 16.838]$. Para propósitos de clasificación, se transforman los valores del fenotipo a valores categóricos, asignándole la clase "no-lechera", si el fenotipo fue ≤ 0 , y la clase "lechera", si el fenotipo fue > 0 . Como resultado, se tienen 670 vacas catalogadas como "no-lechera" y 422, como "lechera".

Para evaluar el desempeño de cada algoritmo, se generaron diferentes subconjuntos conteniendo SNPs de grupos de cromosomas que contienen un alto número de QTLs relacionados a la producción lechera. Los datasets considerados se describen a continuación:

- A. El conjunto completo de SNPs con los 29 cromosomas.
- B. El conjunto formado con los SNPs correspondientes al cromosoma 14.
- C. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 6 y 14.
- D. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 5, 6 y 14.
- E. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 1, 5, 6 y 14.
- F. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 1, 5, 6, 14 y 20.
- G. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 1, 5, 6, 14, 17 y 20.



- H. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 1, 5, 6, 14, 17, 20 y 26.
- I. El conjunto formado por los SNPs de los cromosomas 1 y 14.

La Tabla 2 presenta los resultados para el árbol de decisión, donde la primera columna indica el dataset utilizado, la segunda columna muestra la precisión de la clasificación y la tercera columna muestra el número de nodos en el árbol resultante.

Tabla 2. Precisión de la clasificación usando árboles de decisión.

Conjunto de datos	Precisión del conjunto de pruebas (%)	Núm. de nodos en el árbol resultante
a	93.6	67
b	91.8	117
c	91.8	107
d	90.9	93
e	90.9	95
f	93.6	93
g	90.9	85
h	94.5	85
i	94.5	97

Como puede verse, en todos los casos se obtuvo una precisión superior al 90%. Los mejores resultados de la clasificación se obtuvieron para los datasets (h) e (i), de los cuales el dataset más pequeño es el (i) que incluye los cromosomas 1 y 14, alcanzando una precisión de 94.5%.

En cuanto al tiempo de procesamiento, con el conjunto de datos que incluye todos los cromosomas, se re-

quirieron, aproximadamente, 30 horas de procesamiento. Cuando se utilizó el dataset que incluye solo al cromosoma 14, el tiempo de ejecución fue de, aproximadamente, 1.4 horas.

En Python, la clase `DecisionTreeClassifier` cuenta con un método llamado `feature_importances_` que devuelve la importancia de las características empleadas en la clasificación (los valores de entrada). Con todos los conjuntos de datos, el algoritmo selecciona el SNP con posición 1455997 perteneciente al cromosoma 14 como el SNP más influyente. Su valor de influencia fue de aproximadamente 0.46, pudiendo variar ligeramente según el dataset considerado. Como una verificación adicional se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre todos los SNPs y el fenotipo de interés: el SNP con posición 1455997 tiene una correlación de 0.73 con el fenotipo, mientras que ningún otro SNP obtuvo una correlación más significativa de 0.30.

Con la intención de investigar si el SNP más influyente



está asociado con un QTL asociado con la producción de leche, se realizó una búsqueda genómica en los QTL usando la base de datos Cattle QTL database (Cattle QTL database, <https://www.animalgenome.org/cgi-bin/QTLdb/BT/index>). El SNP en cuestión está dentro del QTL #121637 relacionado con la producción de leche a 305 días, en ganado de raza Holstein, considerando una expansión de 1.4 a 5.3 Mbp en el cromosoma 14 según puede verse en la Figura 2.



Figura 2. El SNP más influyente está en un QTL relacionado con la producción lechera a 305 días en ganado Holstein.

CONCLUSIONES

En este estudio se muestra el resultado de utilizar una técnica de ML para la clasificación de vacas lecheras, específicamente se utilizan árboles de decisión.

Los árboles de decisión además de identificar con muy alta precisión a las muestras dadas, identifica con éxito el SNP más importante al hacer la clasificación. Esto puede conducir a ahorros económicos pues solo se requiere genotipificar al cromosoma 14 para obtener muy buenos resultados. Aunque ya se sabía que éste es el cromosoma más relacionado con la producción lechera, no se sabía que era suficiente para determinar la clasificación.

El algoritmo de árboles de decisión estudiado es capaz de gestionar de manera efectiva la información del genoma completo bovino lo que lo hace adecuado para la implementación de herramientas de predicción de rasgos económicos en la industria lechera.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cámara Nacional de Industriales de la Leche (CANILEC), "Estadísticas del sector lácteo 2010-2020," 2021.
- [2] G. R. Wiggans, J. B. Cole, S. M. Hubbard, and T. S. Sonstegard, "Genomic Selection in Dairy Cattle: The USDA Experience," *Annu. Rev. Anim. Biosci.*, vol. 5, pp. 309–327, 2017.
- [3] C. E. Rabier, P. Barre, T. Asp, G. Charmet, and B. Mangin, "On the accuracy of genomic selection," *PLoS One*, vol. 11, no. 6, pp. 1–23, 2016.
- [4] B. Hayes and M. Goddard, "Genome-wide association and genomic selection in animal breeding," *Genome*, vol. 53, no. 11, pp. 876–883, 2010.
- [5] M. E. Goddard and B. J. Hayes, "Genomic selection," *J. Anim. Breed. Genet.*, no. 124, pp. 323–330, 2007.
- [6] B. Li, N. Zhang, Y. G. Wang, A. W. George, A. Reverter, and Y. Li, "Genomic prediction of breeding values using a subset of SNPs identified by three machine learning methods," *Front. Genet.*, vol. 9, no. JUL, pp. 1–20, 2018.
- [7] M. I. Jordan and T. M. Mitchell, "Machine learning: Trends, perspectives, and prospects," *vol. 349*, no. 6245, 2015.
- [8] S. B. Kotsiantis, "Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques," *Informatica*, vol. 31, pp. 249–268, 2007.
- [9] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, "Unsupervised Learning," in *The Elements of Statistical Learning*, 2009, pp. 486–585.
- [10] Z. Chen, Y. Yao, P. Ma, Q. Wang, and Y. Pan, "Haplotype-based genome-wide association study identifies loci and candidate genes for milk yield in Holsteins," *PLoS One*, vol. 13, no. 2, pp. 1–13, 2018.
- [11] M. A. Cleveland, J. M. Hickey, and S. Forni, "A common dataset for genomic analysis of livestock populations," *G3 Genes, Genomes, Genet.*, vol. 2, no. 4, pp. 429–435, 2012.

Cómo citar este artículo:

RODRIGUEZ ALCANTAR, E. (2022). Árboles de decisión para clasificación de vacas lecheras usando información genética. *EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.220>



Estado actual del conocimiento de la medusa bola de cañón (*Stomolophus meleagris*)

Current status of the knowledge of the cannonball Jellyfish (*Stomolophus meleagris*)

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Sastré-Velásquez¹
Rodríguez-Armenta²
Minjarez-Osorio³
De La Re-Vega⁴

Recibido: 19 / 08 / 2022

Aceptado: 03 / 11 / 2022

Publicado: 16 / 11 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.245>

Autor de Correspondencia:

Enrique De La Re-Vega

Correo: enrique.delare@unison.mx

Resumen

Las medusas son un grupo taxonómico de los más ancestrales dentro de la filogenia animal. Han habitado el planeta aproximadamente hace 500 millones de años sobreviviendo ante múltiples eventos de extinciones masivas, lo que las convierte en un grupo de gran éxito biológico. Las medusas de la clase Scyphozoa destacan a nivel mundial debido a que entre otras cosas cuentan con características de interés culinario. Dentro de este grupo se encuentra la medusa bola de cañón *Stomolophus meleagris*, misma que además ha llamado la atención de la comunidad científica debido a eventos de proliferación masiva conocidos como "blooms" en distintas costas del planeta. La información sobre medusas suele ser escasa y dispersa. Es por ello, que esta revisión pretende ofrecer la información básica necesaria referente a *S. meleagris*; con la cual se pueda apoyar a los futuros investigadores interesados en el estudio de la medusa bola de cañón.

Palabras clave: medusa, Scyphozoa, Filogenia, *Stomolophus*, Blooms.

Abstract

*Jellyfish is one of the most ancient taxonomic groups in the animal phylogeny; they have inhabited the planet for approximately 500 million years surviving multiple mass extinction events, which is why these organisms are considered as a group of a great biological success. Jellyfish of the Scyphozoa kind are worldwide distinguished, among other reasons, for their characteristics of culinary interest. In this group, the cannonball jellyfish, *Stomolophus meleagris*, has attracted the attention of the scientific community due to massive proliferation events known as "blooms" in different coasts of the planet. The information about jellyfish is usually limited and scattered. Therefore, the aim of this review is to offer the necessary basic information regarding to *S. meleagris*, which may support future researchers interested in the study of the cannonball jellyfish.*

Keywords: jellyfish, Scyphozoa, Phylogeny, *Stomolophus*, Blooms.

¹ M.C. Carlos Daniel Sastré-Velásquez, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, daniel.sastre@unison.mx, ORCID: 0000-0003-4980-9778

² Dra. Chrystian Mariana Rodríguez-Armenta, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, chrystian.rodriguez@unison.mx, ORCID: 0000-0002-8757-2583

³ Dr. Christian Minjarez-Osorio, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, christian.minjarez@unison.mx, ORCID: 0000-0003-1197-3345

⁴ Dr. Enrique De La Re-Vega, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, enrique.delare@unison.mx, ORCID: 0000-0001-7265-911X



INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia evolutiva de los organismos, se han observado cambios graduales entre la gran diversidad de especies que existen en la actualidad y aquellas que existieron en el pasado [1]. Múltiples estudios de tipo bioquímicos, biogeográficos y geológicos sustentan que la biología de los organismos se ve alterada dependiendo de la severidad de las condiciones ambientales a la cual se exponen; lo que genera la gran diversidad de especies que se han desarrollado dentro del reino animal. Esto hace necesario establecer relaciones filogenéticas entre las especies y los cambios fisiológicos que promueve la variabilidad del ambiente en ellos [2].

Las especies que habitan este planeta se adaptan gradualmente a las condiciones ambientales y se acoplan a los cambios morfológicos adecuados para lograr su sobrevivencia [3]. En contraste, existen especies ancestrales como los Cnidarios (medusas, corales y anémonas de mar), los cuales desde su aparición en la tierra presentan una forma bastante similar a la de los Cnidarios actuales, experimentando pocos cambios en su morfología a lo largo del tiempo. El filo Cnidaria es un grupo de organismos que aparecieron muy tempranamente después de las primeras formas multicelulares animales. No obstante, estos organismos han conservado su morfología ancestral, lo que sugiere que han sufrido muy pocos cambios desde su origen [4]. Dentro del filo de los Cnidarios se encuentra el subfilo Medusozoa; el cual incluye a las clases Cubozoa, Hydrozoa, Staurozoa y Scyphozoa (figura 1) [5]. El subfilo de los Medusozoos se ha diversificado a tal punto, que se han reportado especies de medusas principalmente de vida marina [6], pero también dulceacuícola y de ambientes costeros [7].

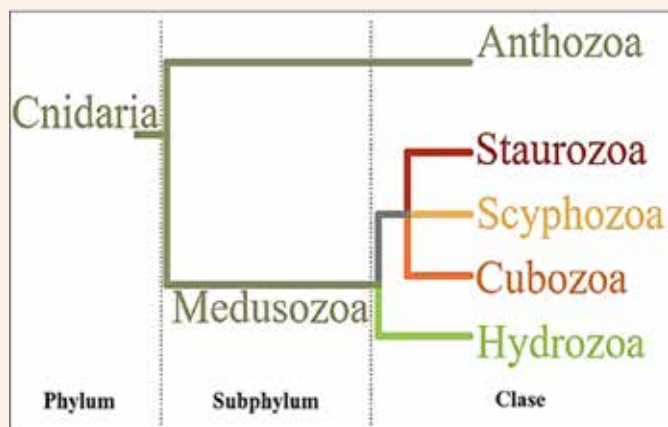


Figura 1. Relaciones evolutivas dentro del Phylum Cnidaria, clasificación tradicional [5].

Las medusas de la clase Scyphozoa (comúnmente llamadas escifozoos) se pueden alimentar de larvas, huevos de peces, cladóceros, hidromedusas, ctenóforos, copépodos, crustáceos pequeños y algunos tipos de microplankton; de tal modo que la capacidad de depredación está



fuertemente asociada al tamaño de la presa. Por otro lado, las medusas son presas de sifonóforos, ctenóforos, peces, tortugas marinas, aves y focas [8]. Dentro de la clase de los escifozoos se encuentran las medusas del orden Rhizostomae, las cuales no tienen tentáculos en el borde de la campana como comúnmente ocurre con las medusas. Además, carecen de una boca central, la cual es sustituida por pequeñas "bocas" denominadas ostiolas, los cuales comunican al exterior con un sistema de canales que llevan hacia ocho apéndices en el interior con forma de brazos [9]. Dentro de este orden se ubica el género *Stomolophus*, cuya especie *Stomolophus meleagris* es conocida comúnmente como la medusa "bola de cañón" [10], especie de interés en la presente revisión. El presente artículo de revisión pretende ofrecer a los futuros investigadores una amplia visión de la información acerca de la medusa bola de cañón de manera cronológica y con ello optimizar el tiempo de búsqueda de la información, misma que se ha dispersado bastante a través del tiempo.

El género *Stomolophus*

Actualmente, dentro del orden Rhizostomae se incluyen a los géneros *Cassiopea*, *Cephea*, *Eupilema*, *Mastigias*, *Rhizostoma* y *Stomolophus*, estos últimos dos estuvieron estrechamente relacionados, a tal punto, que la especie entonces conocida como *Cephea rhizostoma* [11], se identificó posteriormente como *Stomolophus meleagris* [12]; y a partir de sus características particulares como en la terminación de los brazos orales, se reconoció como especie tipo del género *Stomolophus* [13]. Los estudios de Agassiz [12] [14] lograron describir a la especie *Stomolophus meleagris* dentro de la familia *Stomolophidae* (tabla 1), de tal modo que con el tiempo a *Stomolophus meleagris* se le conoció comúnmente como la medusa bola de cañón debido a su particular forma casi esférica.

Tabla 1. Clasificación taxonómica completa de *Stomolophus meleagris* (Agassiz, 1862) [10]

Reino	Animalia
Phylum	Cnidaria
Subphylum	Medusozoa
Clase	Scyphozoa
Orden	Rhizostomae
Familia	Stomolophidae
Género	<i>Stomolophus</i>
Especie	<i>Stomolophus meleagris</i>

La medusa *S. meleagris* es capaz de nadar activamente utilizando la musculatura de la región sub-umbrelar (debajo de la campana), posee simetría radial y dos tipos de tejidos diferenciados y organizados; mismos que están dispuestos hacia el exterior e interior del individuo (ectodermo y endodermo, respectivamente), característica por la cual se define como un organismo diblástico [9]. Dentro de sus características morfológicas, se puede destacar que la parte superior se compone principalmente por una campana (umbrela) de aproximadamente 18 cm de diámetro, en forma de medio huevo con una consistencia gelatinosa y rígida.

Asimismo, la parte inferior está formada por ocho brazos orales fusionados de aproximadamente 5 cm de longitud, los cuales llevan a una boca central que está conectada hacia la cavidad gástrica en el interior del organismo en donde se asimila el alimento (figura 2) [13] [15]. Adicionalmente, se ha reportado que las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la medusa *S. meleagris* es una temperatura de 22.5 °C, salinidad del agua de 36 ppm, concentraciones de oxígeno disuelto de 4.9 mg/L y un pH de 8.3 [16].

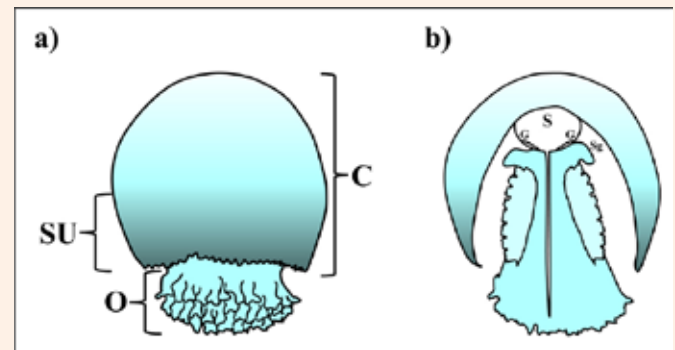


Figura 2. Morfología de *Stomolophus meleagris*. a) Morfología externa, C: campana o umbrela; SU: región sub-umbrelar; O: brazos orales. b) Corte longitudinal, S: cavidad gástrica; G: gónadas; Sg: Fosa subgenital [13] [18].

Cabe señalar, que la medusa bola de cañón tiene una amplia distribución en México, encontrándose en diez de los 17 estados costeros del país, de los cuales siete pertenecen al Golfo de México y diez al Pacífico Mexicano [8]. La alta presencia de *S. meleagris* en estos sistemas lagunares puede deberse a distintos factores, entre ellos la penetración de masas de aguas marinas a los cuerpos lagunares por mareas o corrientes, así como la alta disponibilidad de alimento [17].

Ciclo de vida

La figura 3, muestra el ciclo de vida de *S. meleagris* que inicia desde la fase de medusa adulta, en la cual se lleva a cabo la reproducción sexual por medio de la liberación de gametos (figura 3a) al medio marino, tanto del macho como de la hembra, presentándose una fecundación de tipo externa. El gameto fertilizado desarrollará una larva ciliada de vida libre conocida como "plánula" (figura 3b). Las plánulas son alargadas las cuales van desde 120 hasta





los 390 μm de longitud y aplanadas con aproximadamente 130 μm de ancho. Esta fase es diblástica, el endodermo sólido en el interior y envuelto por un ectodermo con cilios a su alrededor, con los cuales nada para adherirse a los bentos y posteriormente transformarse en un “escifostoma” o comúnmente llamado “pólipo”.

La fijación de la plánula en el fondo marino es el punto de partida de la fase sésil del ciclo de vida de esta especie. La plánula, se une a los bentos por su extremo anterior formando una especie de tallo, modificando su forma a medida que el tallo se estrecha; mientras que la parte posterior de la plánula queda dispuesta hacia arriba y se expande hasta que se desarrolla un pólipo juvenil (figura 3c). La altura de este pólipo varía entre 200 y 430 μm , desde la base del tallo hasta la boca ubicada en el ápice. Posteriormente, aparecen los tentáculos alrededor de la boca, generalmente en números de cuatro, aunque en algunos casos pueden ser tan escasos como dos, o tan abundantes como ocho [18].

Una vez que se alcanza la etapa de pólipo maduro (figura 3d) este puede poseer hasta 16 tentáculos y hasta 2 mm de altura desde su base hasta el extremo de los tentáculos. Si las condiciones del ambiente no son propicias, este puede reproducirse por vía asexual formando podocistos (figura 3e), mismos que darán origen a un nuevo escifostoma con la misma información genética, pero con mayor capacidad de resistir eficientemente a las presiones ambientales [18].

Por otro lado, cuando las condiciones ambientales son favorables para el pólipo maduro, inicia el proceso de “estrobilación”; por lo que el organismo ahora se denomina “estróbilo”. La primera indicación externa de que el proceso de estrobilación ha comenzado, es la formación de pequeños lóbulos en la base de los tentáculos, seguido de la elongación del ápice del ahora estróbilo juvenil. Aproximadamente seis horas después se puede apreciar un proceso de segmentación en el estróbilo juvenil (figura 3f) en dónde cuenta con una incisión circular alrededor del anillo de tentáculos, misma que se va haciendo cada vez más profunda. Con el paso del tiempo, más incisiones aparecen justo debajo de la primera, llegando a observarse un estróbilo con bastantes segmentos en columna, cada uno

de estos darán origen una “éfira” (siguiente forma del ciclo de vida) [18] [19].

Alrededor de 36 horas después de iniciado el proceso de estrobilación, los tentáculos comienzan a sufrir una regresión hasta el punto de que éstos son absorbidos. Simultáneamente con la regresión de los tentáculos, cada segmento comienza a alargar ocho protuberancias las cuales son conocidos como “ropalios”, cada uno de éstos se divide en sus extremos hasta contar con dos puntas finas. En este punto, cada segmento comenzará a diferenciarse del pólipo en la base del estróbilo maduro (ubicado en el tallo, debajo de todos los segmentos en desarrollo, figura 3g); de modo que cada segmento que se separa da origen a una éfira (figura 3h), a esta estructura del ciclo de vida se le conoce como “medusa juvenil” [19]. Las éfiras se liberan entre tres y cinco días después de que inició la estrobilación y presentan un tamaño de 1.5 a 2 mm de diámetro, volviéndose capaces de nadar activamente por medio de contracciones sobre sí misma, comenzando la fase móvil del ciclo de vida de *S. meleagris*.

El estróbilo que se quedó en el bento puede volver a formar un pólipo maduro que continuará con su propia sobrevivencia y que seguirá siendo capaz de volver a pasar por el proceso de estrobilación. Finalmente, es la éfira quien se desarrollará en una medusa adulta (figura 3i) de vida libre; lo anterior, al unir sus ropalios dando origen a lo que será la campana y con la posterior aparición de los brazos orales desde el centro. Esto permitirá la formación de la cavidad gástrica en dónde se desarrollarán las gónadas, estructuras sexuales las cuales definen a una medusa adulta, capaz de liberar gametos al medio marino para que el ciclo continúe [18].

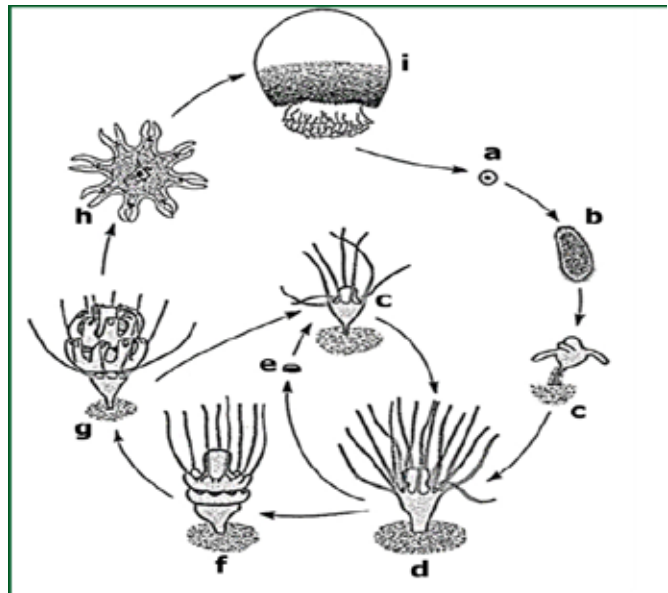


Figura 3. Ciclo de vida de *Stomolophus meleagris*. a) gameto, b) plánula, c) pólipo juvenil, d) pólipo maduro, e) podocisto, f) estróbilo juvenil, g) estróbilo maduro, h) éfira y i) medusa [18].



Plasticidad fenotípica

La medusa bola de cañón es fácil de reconocer debido a su forma, aunque cabe mencionar que la coloración es un tema que siempre genera dudas entre los investigadores. Lo anterior, debido a que esta medusa muestra variaciones de color, presentando fenotipos marrón, blanco, púrpura y azul; además de diferentes patrones de pigmentación caracterizados por ser lisas o con puntos. La pregunta recurrente es: ¿Son todas estas coloraciones la misma especie de *Stomolophus*? Un estudio reciente evaluó la estructura genética de *S. meleagris* dentro del Golfo de California para medusas con los fenotipos azul, blanco y púrpura. A partir de estas coloraciones, se definieron nueve fenotipos diferentes: 1. Púrpura sin puntos, 2. Púrpura con puntos grandes, 3. Púrpura con puntos pequeños, 4. Blancas con puntos, 5. Blancas sin puntos, 6. Blancas con brazos orales pronunciados y alargados, 7. Azules con puntos, 8. Azules sin puntos y 9. Azules con brazos orales cortos. De todos ellos, predomina el fenotipo azul, seguido del blanco y por último el púrpura [20]. A partir de análisis moleculares con el gen de la citocromo oxidasa 1 y el de la subunidad 12S del ARN ribosomal, no se encontraron patrones definidos sobre alguna agrupación independiente que estuvieran relacionadas con el color para todas las localidades muestreadas dentro del Golfo de California. Además, mediante un análisis de regresión, encontraron que las medusas de coloración blanca se ubicaron en localidades más frías, con una temperatura del agua entre 20 y 24 °C; mientras que las medusas de coloración azul se encontraron en cuerpos de agua por encima de los 24 °C. De esta manera, la medusa *S. meleagris* en el Golfo de California existe como un único stock genético y los distintos patrones de pigmentación observados para esta especie pueden resultar de condiciones ambientales específicas no definidas hasta el momento [20].

Madurez sexual

Como se mencionó anteriormente, el ciclo de vida de *S. meleagris* pasa por varias fases, de las cuales la fase medusa adulta se destaca por tener función sexual. Los

organismos son considerados como "adultos" una vez que alcanzan la madurez sexual; sin embargo, esta especie no presenta dimorfismo sexual, por lo cual se tiene que hacer una revisión exhaustiva del tejido que comprende a las gónadas para poder determinar el sexo de algún individuo. En un esfuerzo por comprender mejor la etapa reproductiva y el sexo de *S. meleagris*, se identificaron cinco estados de madurez sexual, los cuales se denominaron: indeterminados, hembras inmaduras, machos inmaduros, hembras maduras y machos maduros (figura 4) [8]. Se determinó el sexo de 777 ejemplares cuyo estado de madurez sexual se distribuyó para 687 individuos como indeterminados, 7 hembras inmaduras, 16 machos inmaduros, 31 hembras maduras y 36 machos maduros.

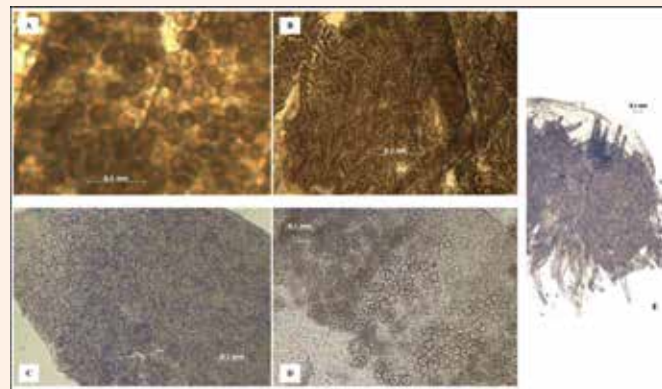


Figura 4. Estados de madurez sexual según el tejido gonádico de *Stomolophus meleagris*. A) hembra madura, B) macho maduro, C) hembra inmadura, D) macho inmaduro y E) organismo indeterminado [8].

Por otro lado, la talla mínima de madurez sexual para el caso de las hembras fue de 4.49 cm mientras que para machos fue de 3.49 cm. Además, en el mismo estudio se menciona que para todas las localidades los machos maduraron antes que las hembras. Sin embargo, el tamaño de las medusas no está relacionado con la madurez sexual, esto debido a que se obtuvieron organismos de un tamaño superior al promedio de madurez sexual; los cuales fueron identificados como sexualmente inmaduros, teniendo una gran variabilidad de madurez sexual según los tamaños para diferentes poblaciones de la misma especie [8] [21].

Entre los factores que pueden influir a la talla mínima de madurez sexual, el que mayormente afecta es el balance entre la energía destinada al crecimiento somático y al reproductivo. Esto debido a que, cuando el alimento es limitado, la tasa de crecimiento disminuye provocando cambios en la energía destinada para la reproducción, por lo que la talla mínima de maduración sexual se presenta en tallas chicas. Por el contrario, cuando una medusa se desarrolla en presencia de abundante alimento, crece a mayor velocidad a expensas del desarrollo gonádico. Por lo que la maduración sexual depende de la talla de crecimiento corporal, la cual está relacionada con el alimento presente en el ambiente [22] [23] [24].



Importancia económica

En países asiáticos como China, Japón, Malasia, Corea del Sur, Taiwán y Singapur, las medusas se han utilizado como un recurso comestible durante miles de años. Se han reportado más de 3,800 especies de medusas, de las cuales son 22 las que cuentan con un potencial culinario. Estas especies se caracterizan por pertenecer a la clase Scyphozoa, cuyas características sensoriales son apropiadas para servir como alimento, tales como cuerpos más rígidos y grandes en comparación con las medusas de otras clases, además de que los scyphozoos comestibles suelen carecer de toxicidad. Entre los países que actualmente consumen esta medusa como alimento se mencionan a: Argentina, Australia, Baréin, Birmania, Canadá, China, Corea del Sur, Ecuador, Estados Unidos, Filipinas, Honduras, India, Indonesia, Irán, Japón, Malasia, Nicaragua, Pakistán, Perú, Rusia, Sri Lanka, Tailandia, Turquía, Vietnam y claro, México (figura 5) [25].

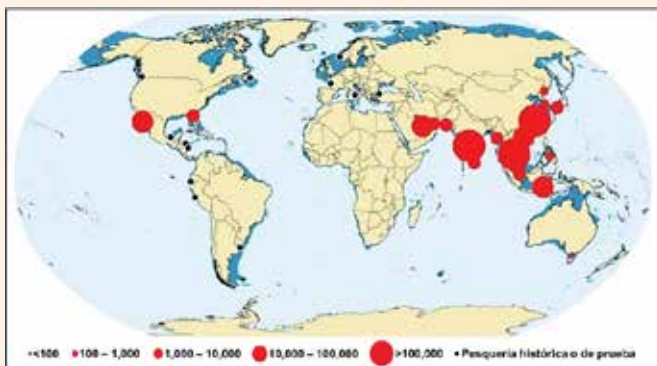


Figura 5. Pesca de medusas en todo el mundo. Los círculos negros y rojos representan la magnitud de captura en toneladas [25].

La medusa bola de cañón *S. meleagris*, es la única que se pesca y se comercializa en las costas mexicanas, presentándose de manera abundante en las costas del Golfo de México, Golfo de California y el Océano Pacífico. Existen

registros de *S. meleagris* en aguas mexicanas desde finales de la década de los setenta [26]; sin embargo, su pesquería se desarrolló en el año 2000 en el Golfo de México en la costa de Tabasco, con un primer permiso de pesca, lo que permitió la construcción de la primera planta mexicana de procesamiento de medusas. No obstante, la pesquería se reubicó hacia el Golfo de California un año después en las aguas costeras del estado de Sonora. Como resultado de acuerdos científicos entre el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR) y compañías pesqueras [27], para el año 2004 se tenían resultados interesantes y descubrimientos biológicos sobre *S. meleagris*.

El arte o método de pesca utilizado para la medusa bola de cañón en México, se lleva a cabo en embarcaciones menores con un máximo de tres pescadores, mismos que utilizan redes tipo cuchara. Estas tienen un mango de 1.5 a 2 m de longitud y una malla de 8 a 12 cm de tamaño de poro, con las cuales se pueden atrapar medusas de un tamaño mínimo requerido, reduciendo la pesca de otros tamaños no comerciales, o incluso de otras especies más pequeñas. Este arte de pesca es de los más sencillos, ya que las medusas se localizan en grupos abundantes cerca de la superficie; pues, nadan a baja velocidad y se logra capturar más de un individuo por cada redada. Una embarcación tiene la capacidad de pescar hasta 5 toneladas de medusas, lo cual en mayor escala ha generado ganancias de 300 millones de pesos además de generar hasta 5,000 empleos, por lo que su aprovechamiento en las costas mexicanas es imprescindible [28] [29].

Una vez que se realiza el desembarque, las medusas capturadas se transportan a una planta procesadora en donde tratan a los individuos con mucho cuidado, debido a que pueden ser dañados fácilmente y no ser aptos para su comercialización. El tratamiento que se les da dentro de una planta de procesamiento consiste en exponerlas con abundante sal para lograr su deshidratación y prevenir la descomposición. Una vez deshidratadas, se empaquetan para su exportación, siendo China el principal país al cual México exporta este recurso. Se han logrado capturar entre 10,000 y 15,000 toneladas de medusas por año, con picos

de hasta más de 30,000 toneladas como sucedió en 2015. A la fecha, México tiene alrededor de 20 plantas procesadoras de medusas las cuales se ubican en las costas de Sonora, específicamente en Bahía de Kino, el Golfo de Santa Clara, Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado. Asimismo, en las costas de Baja California en Ensenada y San Felipe [30].

CLASIFICACIÓN ACTUAL

Tomando en cuenta la relevancia económica que la medusa bola de cañón tiene sobre el país, en los últimos años se han sumado esfuerzos por comprender su estructura poblacional con el objetivo de aprovechar correctamente a la medusa como recurso natural. En el año 2017, se realizaron estudios los cuales determinaron que la medusa identificada como *Stomolophus meleagris* que se pesca en el Golfo de California, aparentemente está comprendida por diferentes especies. Lo anterior, se determinó a partir de dos marcadores mitocondriales: citocromo c oxidasa I (COI) y ADNr 16s y dos marcadores nucleares: ADNr 18s y 28s [31]. De tal modo, que los datos obtenidos proponen que la especie identificada como *Stomolophus meleagris*, difiere en estos marcadores genéticos con las medusas *Stomolophus* muestreadas dentro del Golfo de California, además de otras medusas *Stomolophus* muestreadas en las costas de América Central (figura 6). Por lo tanto, la medusa bola de cañón que vive en el Golfo de California pasa de ser especie *meleagris* a una especie no definida aún, denominada como *Stomolophus* sp. 1 (ubicada en el Golfo de Santa Clara, en el Alto Golfo de California) y *Stomolophus* sp. 2 (ubicada en toda la zona sur del Golfo de California). Asimismo, se identificó un organismo del género *Stomolophus* sp. 6 en las costas de Bahía de Kino, Sonora y a pesar de tener suficientes datos moleculares para poder afirmar que se trata de una especie distinta a las que se encuentran en el Golfo de California, no es posible confirmar la presencia de una nueva especie o población basado en la observación de un solo individuo. Por otro lado, se identificaron a las medusas *Stomolophus* sp. 3, sp. 4 y sp. 5 en las costas de América Central, siendo la primera de la costa Oeste y las últimas dos al este.

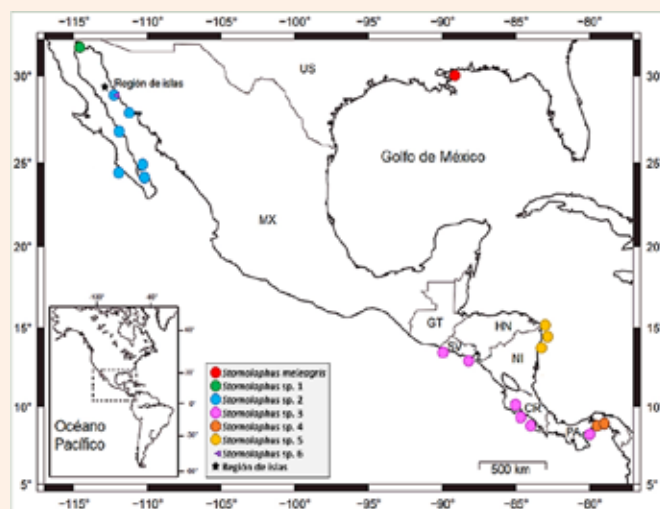


Figura 6. Distribución de las *Stomolophus* spp. en México [31].

El estudio anterior sirve para conocer la distribución genotípica de las poblaciones con las cuales se cuenta, así como poder proponer mejores estrategias para la conservación de estos acervos genéticos. Estos hallazgos se han reforzado debido a que en el 2019 se describió la estructura genética de las poblaciones de *Stomolophus* spp., dentro del Golfo de California a partir del análisis de ADN mitocondrial y microsatélites de las *Stomolophus* sp. 1 y sp. 2 [32] [33]. La distribución reportada en 2017 coincidió con los resultados reportados en el estudio del 2019, donde se ubicó a *Stomolophus* sp. 1 al norte de la región de las grandes islas del Golfo de California y *Stomolophus* sp. 2 al sur. Cabe destacar que los autores proponen que el intercambio genético puede estar restringido por la presencia de las grandes islas, debido a que las condiciones oceanográficas de la región aíslan la zona norte del Golfo de California, disminuyendo la dispersión de organismos. De esta manera, se sentaron las bases para futuros análisis de dinámicas poblacionales de las medusas *Stomolophus* spp. promoviendo que futuros estudios se enfoquen a la preservación de la diversidad genética en el norte del Golfo.

CONCLUSIONES

Las medusas son un recurso natural poco explotado en México, pero de gran riqueza biológica por sus características específicas. En los últimos años se ha reportado un aumento abrupto en la abundancia y distribución de las medusas bola de cañón que se localizan en las costas del noroeste de México; el cual se ha propuesto que se relaciona mayormente con el incremento de la temperatura de la masa oceánica. Si bien, tenemos una especie con potencial culinario y de importancia económica para México, hasta el día de hoy se desconoce mucho sobre su biología, por lo que se destaca la importancia por esclarecer cuáles son los mecanismos etológicos, ecológicos, fisiológicos, bioquímicos



cos, moleculares y demás, los cuales les permiten enfrentar los grandes cambios ambientales que hoy día se están presentando.

Una perspectiva futura para *S. meleagris* en México es continuar con los planes de pesca y exportación, para lograr un aprovechamiento óptimo de este recurso en el país. Además, generar conocimiento que sirva para encontrar tanto las condiciones de cultivo, como los niveles fisicoquímicos y cantidad de nutrientes por volumen de agua, planes alimenticios adecuados, patrones de conducta, entre otros. Esto con la finalidad de dejar de extraer este recurso del medio silvestre de manera oportuna; teniendo que esperar a que las condiciones ambientales permitan la aparición de la fase medusa y su maduración hasta la etapa adulta. Así, existe la perspectiva futura de producir la medusa de manera deliberada y controlada, sin comprometer a las poblaciones silvestres de la medusa bola de cañón. En esta revisión se otorga la información mínima requerida para continuar con la investigación para la generación de ciencia básica y aplicada que contribuya en la conservación de la especie.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Oparin, El origen de la vida. Distrito Federal, México: Editores Mexicanos Unidos S.A., 1924, pp. 107.
- [2] N. Lane, La cuestión vital ¿Por qué la vida es como es?. Primera edición. Barcelona, España: Editorial Planeta, 2015, pp. 414.
- [3] H. Arita, Crónicas de la extinción: La vida y la muerte de las especies animales. Primera edición. Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica, 2016, pp. 19-42.
- [4] J. Scott, The butterflies of north America. First edition. Stanford, California: Stanford University Press, 1986, pp. 87.
- [5] F. Zapata, F. Goetz, S. Smith, M. Howison, S. Siebert, S. Church, S. Sanders, C. Ames, C. McFadden, S. France, M. Daly, A. Collins, S. Haddock, C. Dunn and P. Cartwright, "Phylogenomic Analyses Support Traditional Relationships within Cnidaria", PLoS ONE, vol. 10, no. 10 pp. 1-13, October 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139068>.
- [6] R. Larson, "Feeding and growth of the sea nettle *Chysaora quinquecirrha* (DeSor) in the laboratory", Estuaries, vol. 9, pp. 376-379, December 1986. DOI: <https://doi.org/10.2307/1351418>.

- [7] C. Suchman and B. Sullivan, "Effect of prey Size on vulnerability of copepods to predation by scyphomedusae *Aurelia aurita* and *Cyanea* sp", J. Plankton Res., vol. 22, no. 12 pp. 2289-2306, December 2000. DOI: <https://doi.org/10.1093/plankt/22.12.2289>.
- [8] F. Puente-Tapia, "Distribución en México de *Stomolophus meleagris* L. Agassiz, 1862 (Cnidaria: Scyphozoa: Rhizostomeae) y aspectos poblacionales en algunos sistemas estuarino lagunares", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, U.N.A.M., Ciudad de México, Edo. Mex., 2009.
- [9] R. Brusca and G. Brusca, Filo Cnidarios (Cnidaria). En: Invertebrados. Segunda edición. Madrid, España: Editorial interamericana, 2005, pp. 237-292.
- [10] A. Pico-Vargas, J. Quirós-Rodríguez and C. Cedeño-Posso, "Primer registro de medusas *Stomolophus meleagris* (Cnidaria: Scyphozoa) en la bahía de Cispatá, Córdoba, Colombia", Rev Bio Mar Oceanogr, vol. 51, no. 3 pp. 709-712, December 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572016000300024>.
- [11] L. Gibbes, Catalogue of fauna of South Carolina. Michigan, E.U.A.: Columbia A.S. Johnston, 1848, pp. 293.
- [12] L. Agassiz, Contributions to the natural history of the United States of America. Vol 4. Boston, E.U.A.: Little Brown and Company, 1862, pp. 138.
- [13] A. Mayer, Medusae of the world. Volume III. The Scyphomedusae. Washington D.C., E.U.A.: Carnegie Institute of Washington Publication, 1910, pp. 709-711.
- [14] L. Agassiz, Contributions to the natural history of the United States of America. Vol 3. Boston, E.U.A.: Little Brown and Company, 1860, pp. 301.
- [15] H. Curtis, N. Barnes, A. Schnek and A. Massarini, Curtis Biología. Séptima edición. Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana, 2011, pp. 541-545.
- [16] L. Carvalho, "Biología reproductiva de la fase medusa de *Stomolophus meleagris* L. Agassiz 1862, en la Laguna Las Guásimas, Sonora, México", Tesis doctoral, CIBNOR S.C. Guaymas, Son., 2009.
- [17] A. Ocaña-Luna and S. Gómez-Aguirre, "Stomolophus meleagris (Scyphozoa: Rhizostomae) en dos lagunas costeras de Oaxaca, Mexico", Anales del Inst. de Biol. Univ. Autón. México ser. Zoo., vol. 70, no. 2 pp. 71-77, Diciembre 1999.





- [18]D. Calder, "Life history of the cannonball jelly-fish, *Stomolophus meleagris* L. Agassiz, 1860 (Scyphozoa, Rhizostomida)", *Biol Bull*, vol. 162, no. 2 pp. 149-162, January 1982. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/1540810>.
- [19]D. Spangenberg, "Recent studies of strobilation in jellyfish", *Oceanogr. Mar. Biol.*, vol. 6, pp. 231-247, January 1968.
- [20]C. Nevárez-López, N. Hernández-Saavedra, A. Sánchez-Paz, D. Rojas-Posadas, A. Muhlia-Almazán and J. López-Martínez, "Colour polymorphism and genetic structure in the cannonball jellyfish (*Stomolophus meleagris*, L. Agassiz, 1860) in the Gulf of California", *Mar. Biol. Res.*, vol. 16, no. 10 pp. 714-728, February 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/17451000.2021.1887495>.
- [21]A. Schiariti, "Historia de vida y dinámica de poblaciones de *Lychnorhiza lucerna* (Scyphozoa) ¿Un recurso pesquero alternativo?", Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. 2008.
- [22]J. Costello, "Complete carbon and nitrogen budgets for the hydromedusa *Cladonema californicum* Hyman (Anthomedusa: Cladonemidae)", *Mar Biol*, vol. 108, pp. 119-128, September 1991. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01313479>.
- [23]H. Ishii and U. Bamstedt, "Food regulation of growth and maturation in a natural population of *Aurelia aurita*", *J. Plankton Res.*, vol. 20, no. 5 pp. 805-816, May 1998. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/20.5.805>.
- [24]C. Lucas, "Reproduction and the life history strategies of the common jellyfish, *Aurelia aurita*, in relation to its ambient environment", *Hydrobiologia*, vol. 451, pp. 229-246, May 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1011836326717>.
- [25]L. Brotz, "Jellyfish fisheries of the world", Tesis doctoral, Universidad de Columbia Británica, Columbia Británica, Canadá, 2016.
- [26]L. Brotz, A. Schiariti, J. López-Martínez, J. Álvarez-Tello, Y. Hsieh, R. Jones, J. Quiñones, Z. Dong, A. Morandini, M. Preciado, E. Laaz and H. Mianzan, "Jellyfish fisheries in the Americas: origin, state of the art, and perspectives on new fishing grounds", *Rev. Fish Biol. Fish.*, vol. 27, no. 1 pp. 1-29, September 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11160-016-9445-y>.
- [27]J. López-Martínez, J. Álvarez-Tello and J. Agüero, (29 de Julio del 2019). La pesca de la medusa en México (Nota científica). Medusozoa México [Online]. Available: <https://medusozoomexico.com.mx/divulgaci%C3%B3n/f/la-pesca-de-la-medusa-en-m%C3%A9xico>.
- [28]J. López-Martínez, C. Nevárez-López, J. Barreiro and G. Arroyo-Gómez, *Manual de buenas prácticas de manejo y procesamiento de Medusa*, Ciudad de México, México: Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA), 2012.
- [29]Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura (INAPESCA), (11 de Junio del 2018). Carta Nacional Pesquera (Diario Oficial de la Federación) [Online] Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/334832/DOF_-_CNP_2017.pdf.
- [30]J. López-Martínez and J. Álvarez-Tello, "The jellyfish fishery in Mexico" *Agr. Sci.*, vol. 4, no. 6 pp. 57-61. June 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/as.2013.46A009>.
- [31]L. Gómez-Daglio and M. Dawson, "Species Richness of jellyfishes (Scyphozoa: Discomedusae) in the tropical eastern Pacific: missed taxa, molecules, and morphology match in a biodiversity hotspot", *Invertebr. Syst.*, vol. 31, no. 5 pp. 635-663, September 2017. DOI: <https://doi.org/10.1071/IS16055>.
- [32]L. Getino-Mamet, T. Valdivia-Carrillo, L. Gómez-Daglio and F. García-De León, "Isolation and characterization of 14 tetranucleotide microsatellite loci for the cannonball jellyfish (*Stomolophus* sp.) by next generation sequencing", *Mol. Biol. Rep.*, vol. 7, pp. 1-4. April 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11033-017-4102-7>.
- [33]L. Getino-Mamet, L. Gómez-Daglio and F. García-De León, "High genetic differentiation in the edible cannonball jellyfish (cnidaria: Scyphozoa: *Stomolophus* spp.) from the Gulf of California, Mexico", *Fish. Res.*, vol. 219, pp. 1-11, August 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.105328>.

Cómo citar este artículo:

Sastré Velásquez, C. D., Rodríguez Armenta, C. M., Minjarez Osorio, C., & De La Re Vega, E. (2022). Estado actual del conocimiento de la medusa bola de cañón (*Stomolophus meleagris*). *EPISTEMUS*, 16(33).
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.245>

El potencial farmacológico de venenos de serpientes de Sonora, México

The Pharmaceutical Potential of Snakes Venoms Sonora, Mexico

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Jorge Jiménez Canale¹
Enrique Fernando Velázquez Contreras²
José Andrei Sarabia Sainz³

Recibido: 25 / 05 / 2022
Aceptado: 7 / 10 / 2022
Publicado: 24 / 11 / 2022
DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.226>

Autor de Correspondencia:
José Andrei Sarabia Sainz
Correo: jose.sarabia@unison.mx

Resumen

Los venenos son mezclas complejas de biomoléculas producidos en glándulas especializadas en diversas plantas o animales. Se ha reportado que los componentes mayoritarios de dichos venenos son péptidos y proteínas; los cuales son principales causantes de los síntomas clínicos derivados de un piquete/mordedura. Adicionalmente, por razones culturales y médicas, las serpientes son, probablemente, los animales venenosos más representativos. Entre estos animales, las serpientes de cascabel son altamente temidas y en muchos casos sus venenos han sido poco estudiados. En el estado de Sonora, México se han descrito 12 especies de serpientes de cascabel, todas consideradas altamente venenosas ya que su mordedura requiere atención médica. En ese sentido, se ha reportado que componentes del veneno de estas especies presentan actividad antibacteriana, anticancerígena, entre otras. En este artículo describimos brevemente que los venenos de algunas serpientes sonorenses contienen prometedores componentes de alta importancia farmacéutica y biotecnológica y por qué deberíamos prestarles atención.

Palabras clave: serpientes, Venenos, Farmacología, Nanotecnología, Nanomedicina .

Abstract

Venoms are complex biomolecules mixtures that are produced in specialized glands in several plants or animals. It has been reported that peptides and proteins are the venoms' major components and are responsible for most of the clinical symptoms derived from a sting/bite. Additionally, snakes are probably the most representative venomous animals, due to cultural and medicinal reasons. Among these, rattlesnakes are highly feared, and in many cases, their venoms have been poorly studied. In the state of Sonora, Mexico, 12 species of rattlesnakes have been described, all considered as highly venomous since their bite requires medical attention. It has been reported that some of these species venoms' components present antibacterial and anticancer activity, among many others. In the present work, we briefly describe how some of these venom components found in the venoms of Sonoran rattlesnakes, are of high pharmaceutical and biotechnological importance and should be paid attention.

Keywords: snakes, Venoms, Pharmacology, Nanotechnology, Nanomedicine.

¹ Dr, Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, jorgejimzc@gmail.com, 0000-0001-8430-763X.

² Dr, Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, enrique.velazquez@unison.mx, 0000-0001-6023-0180.

³ Dr, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, jose.sarabia@unison.mx, 0000-0003-0800-4754.



INTRODUCCIÓN

Existen distintos organismos capaces de producir sustancias nocivas o tóxicas a la salud que conocemos comúnmente como venenos. Un veneno se define como una mezcla compleja, compuesta en su mayoría por péptidos y proteínas [1], la cual es producida en una glándula especializada. Algunos arácnidos (escorpiones y arañas), ciertos insectos como abejas y avispas, y algunas especies de serpientes son capaces de producir venenos [2].

En México, las serpientes son animales sumamente estigmatizados por múltiples razones, entre ellas religiosas y culturales. De manera similar, un mal manejo de su información y percepción en medios de comunicación ha influido en una percepción negativa hacia ellas [3]. Por otro lado, las serpientes en México también son animales emblemáticos. Forman una parte importante de la mitología mexicana y, también del Escudo Nacional y Bandera de México. Adicionalmente, el país ocupa el primer lugar a nivel mundial en diversidad de serpientes, ya que alberga más de 400 especies. Ello representa una cifra muy importante considerando que se han descrito poco menos de 4000 especies en todo el mundo [4].

México es el segundo país con mayor número de especies de serpientes de importancia médica (su mordedura requiere atención médica). Estas se distribuyen en 2 familias, Viperidae con 76 y Elapidae, con 17 especies respectivamente [4]. En ese sentido, dentro de la familia Viperidae encontramos a las serpientes de cascabel con 47 especies descritas en el país, 45 del género *Crotalus* spp., y 2 *Sistrurus* spp.

En México y Centroamérica, la familia de serpientes de mayor importancia médica, por la cantidad de accidentes que causan y la pronta acción de su veneno, es la familia Viperidae. En la figura 1 se muestra una adaptación evolutiva sumamente peculiar de especímenes de la familia Viperidae: la foseta loreal, estructura termosensora que les

ayuda a identificar a sus presas. Adicionalmente, los vipéridos cuentan con glándulas productoras de veneno y colmillos hipodérmicos conectados a ellas. Por otro lado, las serpientes de cascabel se diferencian fácilmente de otros vipéridos por la presencia de un apéndice queratinoso sonoro localizado al final de la cola, la cual se conoce coloquialmente como un “cascabel” [5].

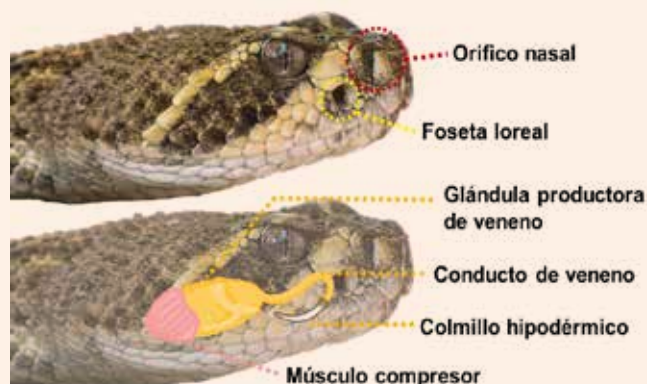


Figura 1. Imagen de cabeza de serpiente de la familia Viperidae donde se señalan el orificio nasal, foseta loreal y glándula productora de veneno. Fotografías por Jorge Jiménez Canale.

serpientes en sonora

En Sonora sobresale la presencia de las serpientes de cascabel. De las 75 especies de serpientes reportadas en el estado, solamente 16 especies se consideran de importancia médica, 12 de las cuales son serpientes de cascabel (*Crotalus* spp, familia Viperidae). Las otras especies son *Agkistrodon* sp.(familia Viperidae) y *Micruroides euryxanthus*, *Micrurus distans* e *Hydrophis platurus* (familia Elapidae). En la figura 2, se observan algunas especies de serpientes de cascabel que se encuentran en el estado de Sonora [6].





Figura 2. Serpientes de cascabel presentes en el Estado de Sonora: A. Serpiente de cascabel diamante del Oeste (*C. atrox*) B. Serpiente de cascabel cola negra (*C. molossus*) C. Serpiente de cascabel de cuernitos (*C. cerastes*) D. Serpiente de cascabel de Mojave/Altiplano (*C. scutulatus*) E. Serpiente de cascabel tigre (*C. tigris*). Fotografías por Jorge Jiménez Canale.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que al año ocurren ~5.4 millones de mordeduras de serpientes, las cuales llegan a causar de 80 000 a 137 000 muertes [7]. El panorama en México es un poco distinto, registrándose ~4000 mordeduras, con una tasa de fatalidad del 0.5%. Específicamente para el caso del Estado de Sonora suelen reportarse ~100 mordeduras al año [8]. En ese sentido, científicos han buscado desarrollar antivenenos más baratos, eficaces y accesibles. Para ello, es de trascendental importancia conocer la composición y propiedades de los venenos de las serpientes [9], [10].

Estudios recientes han demostrado que los venenos de especies de serpientes, incluyendo las mexicanas, comparten la presencia de familias de toxinas [11]. En la figura 3 se muestra una representación de la abundancia de las familias de toxinas en serpientes de cascabel del género *Crotalus* spp. Entre estas toxinas destacan como familias dominantes las fosfolipasas A2 (PLA₂s), metaloproteasas (SVMPs) y serinoproteasas (SVSPs). Asimismo, proteínas secretoras ricas en cisteína (CRiSPs), L-aminoácido oxidasas (LAAOs), lectinas de tipo C (CTLs/snaclecs), disintegrinas (DIS) y péptidos natriuréticos (NPs) [1].

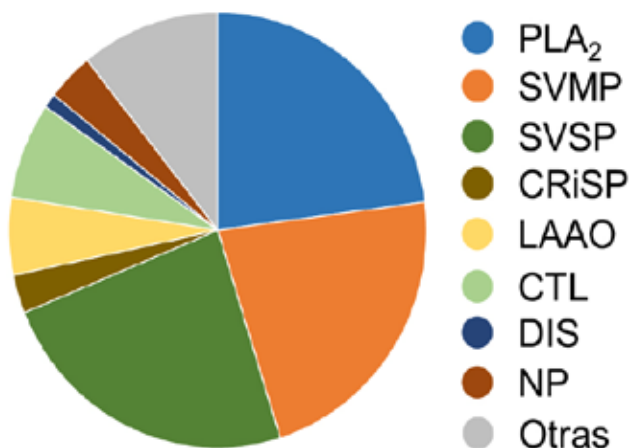


Figura 3. Composición venómica de serpientes de cascabel (*Crotalus* spp.). Imagen modificada de Tasoulis & Isbister, 2017 [1].

Se presume que esta representación va a cambiar rápidamente conforme se avance en el estudio de los venenos de las distintas especies. Los avances en las investigaciones sobre las propiedades tóxicas de las sustancias que se encuentran en los venenos de serpientes han permitido descubrir que, utilizadas en cantidades y formas definidas, pueden tener usos terapéuticos contra diversas enfermedades, incluidos diversos tipos de cáncer [12]. Dada la abundancia de las serpientes de cascabel en el Estado de Sonora, resulta de especial interés estudiar la composición y propiedades de sus venenos, así como su posible aplicación como agentes terapéuticos. Por tal motivo, en el presente artículo nos enfocaremos en los avances que se han realizado en la caracterización de los venenos de serpientes de cascabel sonorenses, enfatizando los estudios para el desarrollo de fármacos.

Composición de venenos de serpientes de cascabel sonorenses

Como se mencionó anteriormente, en el estado de Sonora, México se han descrito 13 especies de vipéridos, de las cuales 12 de ellas son serpientes de cascabel (*Crotalus* spp.). En la tabla 1, se enlistan dichas especies y algunas familias de toxinas que se han reportado se encuentran en sus venenos. En la figura 4 se muestra de manera general el proceso habitual de extracción de veneno de una serpiente, el cual es necesario para el estudio de sus venenos. De forma breve, las serpientes se introducen dentro de un tubo de plástico para evitar movimientos bruscos y controlar la zona de la cabeza de donde son sujetadas, esto reduce el riesgo que la serpiente sufra alguna lesión y otorga seguridad al personal. Posteriormente, se permite que la serpiente muerda un contenedor estéril cubierto con Parafilm, para asemejar tejido. Una vez extraído el veneno, se puede realizar un proceso de liofilización con lo cual el veneno se podrá usar para estudios pertinentes.

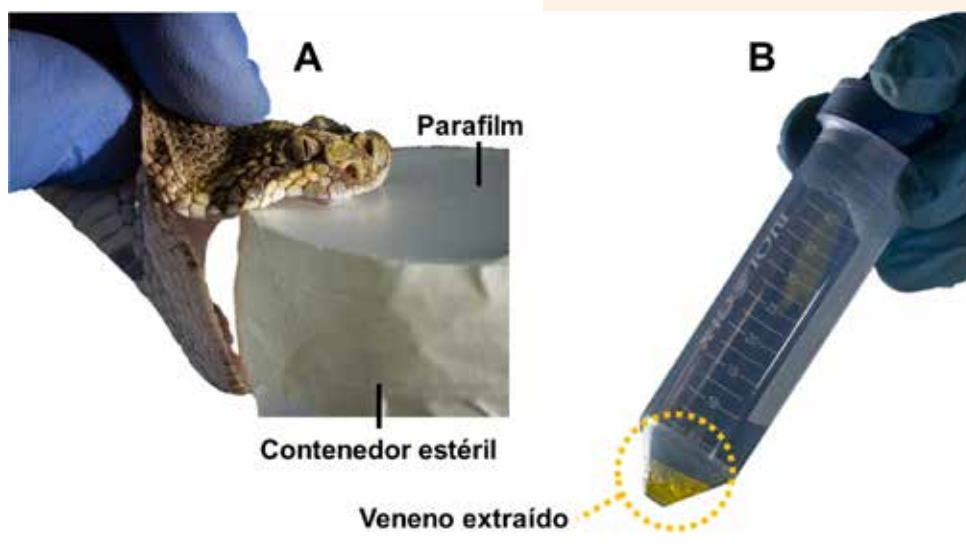


Figura 4. Imágenes de extracción de veneno a serpiente de cascabel en Sonora, México. Fotografías por Rodolfo Vega Littlewood.

Tabla 1. Lista de especies de serpientes de cascabel (*Crotalus* spp.) en Sonora, México [6], [11].

Especie	Familias de toxinas	Referencias
Serpiente de cascabel Diamante del Oeste (<i>C. atrox</i>)	BIPs, BPPs, CNP, CRiSP, Dis, Hya, LAAO, CTL, PLA ₂ , SVMP P-I/III, SVSP, VEGF	[11], [13]
Serpiente de cascabel del Pacífico (<i>C. basiliscus</i>)	PP, CRISP, CTL, Dis, LAAO, PLA ₂ (CRTX, non-CRTX), SVMP P-I/II/III, inhibidor de SVMP, SVSP	[11], [14]
Serpiente de cascabel de cuernitos (<i>C. cerastes</i>)	3FTx, 5'NT, BPP, CRiSP, CTL, Dis, Hya, Kun, LAAO, MYO, NGF, PDE, PLA ₂ , SVMP P-II/III, SVSP, VEGF, WAP	[11], [15], [16]
Serpiente de cascabel de Isla San Esteban (<i>C. estebanensis</i>)	N/D	N/A
Serpiente de cascabel gris (<i>C. lepidus</i>)	5'NT, CRiSP, CTL, Dis, LAAO, PDE, PLA ₂ , SVMP-P-I/III, SVSP (TLE)	[11], [17], [18]
Serpiente de cascabel cola negra (<i>C. molossus</i>)	Dis, LAAO, MYO, PLA ₂ , SVMP P-I/III, SVSP (TLE)	[11], [19], [20]
Serpiente de cascabel de manchas gemelas (<i>C. pricei</i>)	N/D	N/A
Serpiente de cascabel moteada (<i>C. pyrrhus</i>)	LAAO, SVSP, PLA ₂ (CRTX/MTX)	[11], [21]
Serpiente de cascabel de Mojave (<i>C. scutulatus</i>)	5'-NT, APase, BPPs, CRiSP, CTL, Dis, Hya, Kun, LAAO, MYO, NGF, PDE, PLA ₂ (MTX, no-CRTX), SVMP P-I/II/III, SVSP, VEGF	[11], [22], [23]
Serpiente de cascabel tigre (<i>C. tigris</i>)	CRiSP, Dis, PLA ₂ (MTX), SVMP P-III, SVSP, VEGF	[11], [24]
Serpiente de cascabel de praderas (<i>C. viridis</i>)	5'-NT, APase, BPP, CRiSP, CTL, Dis, GC, LAAO, MYO, OHA, PDE, PLA ₂ (CRTX, no-CRTX), PLB, SVMP inhibitor, SVMP P-I/II/III, SVSP (TLE)	[11], [25], [26]
Serpiente de cascabel de nariz surcada (<i>C. willardi</i>)	CRiSP, CTL, Dis, LAAO, PDE, PLA ₂ , SVMP P-I/III, SVSP (TLE)	[11], [27]



Notas: Toxinas de 3 dedos (3-FTX), 5'-nucleotidasa (5'-NT), acetilcolinesterasa (achase), péptido natriurético tipo A (ANP), péptido natriurético tipo B (BNP), péptido natriurético tipo C (CNP), adenosina trifosfatasa (ATPase), péptido inhibidor de bradiquinina (BIP), péptido potenciador de bradiquinina (BPP), lectinas de tipo C (CTL), cisteína proteasa (CysProt), proteína secretora rica en cisteína (CRiSP), crotoxina (CRTX), disintegrina (Dis), factor de crecimiento epidermal (EGF), factor de crecimiento de fibroblasto (FGF), guanilil ciclasa (GC), hialuronidasa (Hya), inhibidor tipo kazal (Kazal), inhibidor tipo kunitz (Kun), L-aminoácido oxidasa (LAAO), Mojave toxina (MTX), miotoxina (MYO), factor de crecimiento nervioso (NGF), ohaina (OHA), fosfodiesterasa (PDE), factor de crecimiento derivado de plaqueta (PDGF), fosfolipasa A2 (PLA2), fosfolipasa B (PLB), fosfolipasa D (PLD), metaloproteasa de veneno de serpiente (SVMP), serinoproteasa de veneno de serpiente (SVSP), enzima tipo trombina (TLE), factor de crecimiento endotelial (VEGF), waparina (WAP), N/D (no determinado).

Algunas familias de toxinas como las SVMPs y SVSPs se asocian al desarrollo de coagulopatías en pacientes [12], mientras que otras como la MTX y CRTX se asocian a problemas asociados al funcionamiento neuromuscular y neurotoxicidad [28]. En ese sentido, la gran variedad de familias de toxinas que se han reportado en los venenos de serpientes de cascabel promueve el estudio de los mismos para la búsqueda de posibles agentes farmacológicos [29]. Adicionalmente, una de las ventajas de utilizar componentes proteicos para el desarrollo de medicinas, es la alta afinidad que tienen con receptores celulares, descartando en ocasiones actividades no deseadas en el organismo por interacción en otras zonas [12].

Potencial farmacéutico de familias de toxinas

La utilización de péptidos y/o proteínas provenientes de venenos de serpientes para desarrollo de medicamentos no es un concepto nuevo. Entre algunas de las desventajas encontramos una baja distribución en el cuerpo cuando son administrados vía oral gracias a la digestión en el estómago. De manera similar, estas moléculas son eliminadas rápidamente del torrente sanguíneo si se administran vía intravenosa, y pueden causar reacciones inmunogénicas. Por otro lado, algunas claras ventajas son la alta especificidad que presentan en ciertos tejidos y células, acción en procesos metabólicos, y actividad anticancerígena mediante diferentes mecanismos. Con base en esta idea, nuestro equipo de investigación ha reportado el potencial uso del veneno de serpientes de cascabel (*C. molossus*), al integrarlo a estructuras nanométricas como nanopartículas contra células de carcinoma mamario (T-47D) [19]. A continuación, describiremos brevemente sobre el potencial uso de toxinas aisladas y familias de toxinas presentes en diferentes venenos de serpientes de cascabel sonorenses, específicamente en enfermedades como cáncer.

Fosfolipasas A2 (PLA2s)

Las fosfolipasas son enzimas de gran interés biotecnológico y farmacológico, esto debido a que están involucradas en diversas enfermedades inflamatorias en humanos, así como en el envenenamiento de venenos de serpientes [30]. Su mecanismo de acción está dirigido al metabolismo de lípidos membranales y, entre sus productos de hidrólisis se genera ácido araquidónico, precursor importante de compuestos como prostaglandinas, tromboxanos, leucotrienos, entre otros [12]. Una de las características de muchas células cancerosas es una biosíntesis y lipogénesis



atípica, por lo que estos componentes del veneno pudieran ser utilizadas contra ellas. Se ha reportado que diversas PLA2s tienen actividad antiproliferativa en modelos tanto in vitro como in vivo, mediante mecanismos como inductores de apoptosis, inhibición de migración celular y angiogénesis [12].

Metaloproteasas (SVMPs)

También conocidas como zinc-metaloproteasas, son proteínas de masa molecular variable y multi dominio, las cuales mediante procesos autoproteolíticos pueden generar agentes bioactivos. Se asocia su acción al desarrollo de hemorragias y cambios en el proceso de coagulación. Se ha reportado que su principal mecanismo de acción es sobre componentes de la matriz extracelular (colágeno, laminina, fibronectina, entre otros) [31]. Dependiendo de su estructura se pueden clasificar en P-I, P-II, P-III y P-IV SVMPs, las cuales hacen referencia a solo el dominio de SVMP, SVMP + DIS, SVMP + DIS + dominio rico en cisteína y SVMP heterodiméricas, respectivamente. Se ha reportado algunos de sus mecanismos de acción antiproliferativa se basan en la acción que presentan inhibiendo procesos adhesión celular (al actuar sobre receptores de integrinas), reduciendo la probabilidad de iniciar un proceso metastásico [12].

Serinoproteasas (SVSPs)

Las serinoproteasas son enzimas que se ha reportado se encuentran en diversos organismos, tanto de plantas como en animales. Aunque han sido relativamente menos estudiadas que otros componentes del veneno de serpientes de cascabel, sabemos que afectan diversas etapas de la cascada de coagulación [32]. Específicamente se reporta que algunos de sus mecanismos de acción están involucrados en la inhibición de agregación plaquetaria, coagulación y fibrinólisis. Si bien, la mayoría de los estudios referentes a estas toxinas están enfocados en desórdenes de coagulación, algunos reportes han indicado que pueden inhibir metástasis en líneas cancerosas de pulmón mediante un proceso de defibrinogénación [33].

L-aminoácido oxidasas (LAAOs)

Estas glicoproteínas se encuentran presentes en organismos como bacterias, plantas y animales. Catalizan una deaminación oxidativa de L-aminoácidos dando productos como ácidos alfa-keto, amoníaco y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [12]. En ese sentido, se ha demostrado que su interacción con receptores de membranas celulares produce altos niveles de H_2O_2 . Lo anterior puede ayudar a inducir un proceso de hipotensión, y curiosamente, se ha observado que esto ocurre de manera específica en células endoteliales de mamíferos. Algunos estudios reportaron que la interacción de estas enzimas en membranas celulares produce un aumento significativo local de H_2O_2 y de esta manera induce apoptosis, sin embargo, también se reportó que este proceso de apoptosis era diferente al



inducido solo por H_2O_2 [34]. Asimismo, se ha reportado que la acción de las LAAOs también está ligada a caspasas (proteasas comunes como marcadores apoptóticos). En este contexto, estas enzimas resultan ser sumamente interesantes, pero hace falta determinar sus mecanismos de acción y seguridad de aplicación.

Lectinas de tipo C de serpientes (CTL)

Las lectinas son proteínas que reconocen y se unen de manera específica a ciertos carbohidratos. Actualmente se han estudiado diversos tipos de lectinas para el desarrollo de agentes antitumorales [35]. Asimismo, se ha reportado que algunas CTLs son capaces de inhibir crecimiento tumoral derivado de las interacciones con las membranas de diversas líneas cancerosas. Estas toxinas pueden adherirse a los receptores de integrinas compitiendo con receptores de la matriz extracelular, los cuales son importantes en el desarrollo celular y tumoral, promoviendo su uso como potenciales agentes antiproliferativos [12], [36].

Desintegrinas (DIS)

Las desintegrinas representan una familia de péptidos no enzimáticos y no tóxicos de relativamente baja masa molecular (< 10 kDa) [37], [38]. Se ha demostrado que ciertas integrinas como las $\alpha\beta$ y subtipos, son receptores sumamente importantes en la adhesión celular de células cancerosas. De manera general, el mecanismo de acción de estas toxinas como inhibidores de crecimiento tumoral y metástasis se basan en el impedimento de la unión de receptores de integrinas tumorales en la matriz extracelular [12]. Algo relevante es que ya se han aprobado medicamentos antiplaquetarios como Tirofiban [39] y Eptifibatida [40], basados en desintegrinas.

En la figura 5 se muestran los componentes que se han caracterizado en los venenos de serpientes de cascabel que ocurren en Sonora. Se anticipa que esta gráfica puede cambiar conforme se profundicen los estudios en especímenes nativos del estado, así como comparándolos con especímenes juveniles y adultos.



Figura 5. Composición venómica de serpientes de cascabel (*Crotalus* spp.) que ocurren en Sonora, México. Imagen modificada según datos de Deshwal et al. (2021) [11].

Es importante aclarar que existe una falta de estudios con respecto a venenos de serpientes sonorenses. Hace falta caracterizar de manera más profunda sus contenidos, así como sus funciones en el cuerpo. En ese sentido, se debe considerar que pueden existir cambios interespecíficos derivado de diferencias geográficas, y también ontogénicos [41], por lo que comparar el veneno de serpientes adultas y juveniles brindará información valiosa.

Las toxinas provenientes de serpientes venenosas representan oportunidades para la investigación y desarrollo de medicamentos, como el cáncer. En la tabla 2 se observa una lista de medicamentos aprobados por la FDA basados en toxinas de serpientes.



Tabla 2. Lista de medicamentos aprobados por la FDA basados en toxinas de serpientes [42].

Fase	Fármaco	Origen	Indicación
Aprobado por la FDA	Captopril	<i>Bothrops jararaca</i>	Hipertensión
	Tirofibán	<i>Echis carinatus</i>	Ataques al corazón
	Eptifibatida	<i>Sistrurus miliaris</i>	Síndrome coronario agudo
	Batroxibina	<i>Bothrops moojeni</i>	Infarto cerebral, embolia pulmonar, trombosis venosa profunda, infarto a miocardio
	Hemocoagulasa	<i>Bothrops atrox</i>	Cirugía plástica, cirugía abdominal, vitrectomía
Fase clínica	Alfimeprasa	<i>Agkistrodon contortix</i>	Oclusión arterial periférica aguda
	Viprinex	<i>Agkistrodon rhodostoma</i>	Infarto cerebral isquémico agudo

El potencial farmacológico que las toxinas provenientes de serpientes venenosas presentan es enorme. En ese sentido, recomendamos aumentar el esfuerzo en los estudios que se les realizan, con la confianza en que lo anterior brindará frutos. Si bien la realidad de poder obtener un producto farmacéutico aprobado por agencias reguladoras es difícil, no es imposible y no debemos permitir que eso frene a futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

Sonora es un estado sumamente biodiverso donde ocurren distintas serpientes de cascabel. Estas serpientes venenosas también cumplen roles importantes en el ambiente, como controladores de roedores. Adicionalmente, los venenos de estas serpientes son fuentes de compuestos con un gran potencial farmacéutico para diversas enfermedades, tales como diabetes, cardiovasculares y cáncer. En un futuro cercano sus venenos podrán salvar un número mayor de vidas que las muertes que ocasionan. Diversos componentes mayoritarios del veneno de serpientes de cascabel (PLA2s, SVMPs, SVSPs, LAAOs, DISs, CTLs, entre otros) ya se han estudiado previamente, y análisis han reportado actividad anticancerígena. Debido a lo anterior, el estudio de los venenos de serpientes de cascabel sonorenses ofrece amplias oportunidades para el desarrollo de nuevos y mejores medicamentos. En la Universidad de Sonora, recientemente un grupo multidisciplinario de investigadores inició una línea de investigación en este tema, cuyos resultados iniciales son muy prometedores.



RECONOCIMIENTOS

Agradecemos la ayuda del Museo Itinerante de Vida Animal (MIVIA), y su director general, Gerardo Lorenzo Acosta Campaña, por su apoyo en el desarrollo de este y otros proyectos, así como sus esfuerzos en la promoción de educación ambiental y conservación de animales ponzoñosos como las serpientes. De manera similar, agradecemos al equipo del Dr. Alejandro Alagón Cano y el Dr. Edgar Neri Castro, del Instituto de Biotecnología de la UNAM, por su ayuda en el desarrollo de temas de investigación relacionados al estudio de los venenos de serpientes mexicanas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Tasoulis and G. Isbister, "A Review and Database of Snake Venom Proteomes," *Toxins*, vol. 9, no. 9, p. 290, Sep. 2017, doi: 10.3390/toxins9090290.
- [2] B. Fry, *Venomous Reptiles and Their Toxins: Evolution, Pathophysiology and Biodiscovery*. Oxford University Press, 2015.
- [3] L. Fernández-Badillo, I. Zuria, J. J. Sigala-Rodríguez, G. Sanchez-Rojas, and G. Castaneda, "Revisión del conflicto humano-serpiente en México.pdf," *Animal Biodiversity and Conservation*, vol. 44, pp. 153–174, May 2021, doi: 10.32800/abc.2021.44.0153.
- [4] "THE REPTILE DATABASE." <http://www.reptile-database.org/> (accessed Feb. 19, 2020).
- [5] J. C. Rorabaugh and J. A. Lemos-Espinal, *A Field Guide to the Amphibians and Reptiles of Sonora*, vol. 1. Rodeo, New Mexico: ECO Herpetological Publishing and Distribution, 2016.
- [6] J. A. Lemos-Espinal, G. R. Smith, and J. C. Rorabaugh, "A conservation checklist of the amphibians and reptiles of Sonora, Mexico, with updated species lists," *ZK*, vol. 829, pp. 131–160, Mar. 2019, doi: 10.3897/zookeys.829.32146.
- [7] "OMS - Mordeduras de serpientes venenosas." <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/snakebite-envenoming> (accessed May 23, 2022).
- [8] "Boletín Epidemiológico Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Sistema Único de Información | Secretaría de Salud | Gobierno | gob.mx." <https://www.gob.mx/salud/documentos/boletinepidemiologico-sistema-nacional-de-vigilancia-epidemiologica-sistema-unico-de-informacion-231750> (accessed Jun. 11, 2020).
- [9] A. Alangode, K. Rajan, and B. G. Nair, "Snake antivenom: Challenges and alternate approaches," *Biochemical Pharmacology*, vol. 181, p. 114135, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.bcp.2020.114135.
- [10] M. Sánchez et al., "Toxicological profile of medically relevant *Crotalus* species from Mexico and their neutralization by a *Crotalus basiliscus/Bothrops asper* antivenom," *Toxicon*, vol. 179, pp. 92–100, May 2020, doi: 10.1016/j.toxicon.2020.03.006.
- [11] A. Deshwal, P. Phan, J. Datta, R. Kannan, and S. K. Thallapuram, "A Meta-Analysis of the Protein Components in Rattlesnake Venom," *Toxins*, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/toxins13060372.
- [12] L. A. Calderon et al., "Antitumoral Activity of Snake Venom Proteins: New Trends in Cancer Therapy," *BioMed Research International*, vol. 2014, pp. 1–19, 2014, doi: 10.1155/2014/203639.
- [13] J. J. Calvete, E. Fasoli, L. Sanz, E. Boschetti, and P. G. Righetti, "Exploring the Venom Proteome of the Western Diamondback Rattlesnake, *Crotalus atrox* , via Snake Venomics and Combinatorial Peptide Ligand Library Approaches," *J. Proteome Res.*, vol. 8, no. 6, pp. 3055–3067, Jun. 2009, doi: 10.1021/pr900249q.
- [14] Á. Segura et al., "Proteomic, toxicological and immunogenic characterization of Mexican west-coast rattlesnake (*Crotalus basiliscus*) venom and its immunological relatedness with the venom of Central American rattlesnake (*Crotalus simus*)," *J Proteomics*, vol. 158, pp. 62–72, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jprot.2017.02.015.
- [15] E. P. Hofmann et al., "Comparative venom-gland transcriptomics and venom proteomics of four Sidewinder Rattlesnake (*Crotalus cerastes*) lineages reveal little differential expression despite individual variation," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, p. 15534, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-33943-5.
- [16] R. M. Rautsaw et al., "Intraspecific sequence and gene expression variation contribute little to venom diversity in sidewinder rattlesnakes (*Crotalus cerastes*)," *Proc Biol Sci*, vol. 286, no. 1906, p. 20190810, Jul. 2019, doi: 10.1098/rspb.2019.0810.
- [17] M. Borja et al., "Morulustatin, A Disintegrin that Inhibits ADP-Induced Platelet Aggregation, Isolated from the Mexican Tamaulipan Rock Rattlesnake (*Crotalus lepidus morulus*)," *Revista científica (Universidad del Zulia. Facultad de Ciencias Veterinarias. Division de Investigacion)*, vol. 26, no. 2, pp. 86–94, 2016.



- [18] "Intra-specific Variation in the Protein Composition and Proteolytic Activity of Venom of *Crotalus lepidus morulus* from the Northeast of Mexico." <https://bioone.org/journals/copeia/volume-2013/issue-4/OT-13-005/Intra-specific-Variation-in-the-Protein-Composition-and-Proteolytic-Activity/10.1643/OT-13-005.full> (accessed May 09, 2022).
- [19] J. Jimenez-Canale et al., "Cytotoxic activity of *Crotalus molossus* snake venom-loaded in chitosan nanoparticles against T-47D breast carcinoma cells," *Acta Biochimica Polonica*, vol. 69, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2022, doi: 10.18388/abp.2020_5975.
- [20] M. Borja et al., "Ontogenetic Change in the Venom of Mexican Black-Tailed Rattlesnakes (*Crotalus molossus nigrescens*)," *Toxins*, vol. 10, no. 12, p. 501, Dec. 2018, doi: 10.3390/toxins10120501.
- [21] K. K. Tan, S. G. Ler, J. Gunaratne, B. H. Bay, and G. Ponnampalam, "In vitro cytotoxicity of L-amino acid oxidase from the venom of *Crotalus mitchellii pyrrhus*," *Toxicon*, vol. 139, pp. 20–30, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.toxicon.2017.09.012.
- [22] M. Borja et al., "Biological and Proteolytic Variation in the Venom of *Crotalus scutulatus scutulatus* from Mexico," *Toxins*, vol. 10, no. 1, p. 35, Jan. 2018, doi: 10.3390/toxins10010035.
- [23] D. J. Massey et al., "Venom variability and envenoming severity outcomes of the *Crotalus scutulatus scutulatus* (Mojave rattlesnake) from Southern Arizona," *Journal of Proteomics*, vol. 75, no. 9, pp. 2576–2587, May 2012, doi: 10.1016/j.jprot.2012.02.035.
- [24] J. J. Calvete et al., "Snake Venomics of *Crotalus tigris*: The Minimalist Toxin Arsenal of the Deadliest Nearctic Rattlesnake Venom" *J Proteome Res*, vol. 11, no. 2, pp. 1382–1390, Feb. 2012, doi: 10.1021/pr201021d.
- [25] C. M. Adade, S. F. Anne Cristine, O. C. Ana Lúcia, R. B. Zingali, and T. Souto-Pradón, "44. Leishmanicidal Effects of a Phospholipase A2 Isolated from *Crotalus viridis viridis* Snake Venom," *Toxicon*, vol. 60, no. 2, p. 117, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.toxicon.2012.04.045.
- [26] C. M. Adade, B. L. Cons, P. A. Melo, and T. Souto-Pradón, "Effect of *Crotalus viridis viridis* snake venom on the ultrastructure and intracellular survival of *Trypanosoma cruzi*," *Parasitology*, vol. 138, no. 1, pp. 46–58, Jan. 2011, doi: 10.1017/S0031182010000958.
- [27] A. J. Saviola, A. J. Gandara, R. W. Bryson, and S. P. Mackessy, "Venom phenotypes of the Rock Rattlesnake (*Crotalus lepidus*) and the Ridge-nosed Rattlesnake (*Crotalus willardi*) from México and the United States," *Toxicon*, vol. 138, pp. 119–129, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.toxicon.2017.08.016.
- [28] J. Dobson et al., "Rattling the border wall: Pathophysiological implications of functional and proteomic venom variation between Mexican and US subspecies of the desert rattlesnake *Crotalus scutulatus*," *Comparative Biochemistry*

- and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, vol. 205, pp. 62–69, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.cbpc.2017.10.008.
- [29] E.-R. M. Redwan, "Animal-Derived Pharmaceutical Proteins," *Journal of Immunoassay and Immunochemistry*, vol. 30, no. 3, pp. 262–290, Jun. 2009, doi: 10.1080/15321810903084400.
- [30] B. Lomonte, Y. Angulo, M. Sasa, and J. M. Gutierrez, "The Phospholipase A2 Homologues of Snake Venoms: Biological Activities and Their Possible Adaptive Roles," 2009. <https://www.ingentaconnect.com/content/ben/ppl/2009/00000016/00000008/art00003> (accessed Mar. 31, 2020).
- [31] J. M. Gutiérrez and A. Rucavado, "Snake venom metalloproteinases: Their role in the pathogenesis of local tissue damage," *Biochimie*, vol. 82, no. 9, pp. 841–850, Sep. 2000, doi: 10.1016/S0300-9084(00)01163-9.
- [32] J. Boldrini-França et al., "Beyond hemostasis: a snake venom serine protease with potassium channel blocking and potential antitumor activities," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 4476, Mar. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-61258-x.
- [33] M. Shibuya et al., "Antimetastatic effect of defibrinogenation with batroxobin depends on the natural killer activity of host in mice," *J Cancer Res Clin Oncol*, vol. 116, no. 2, pp. 168–172, Mar. 1990, doi: 10.1007/BF01612672.
- [34] S.-M. Suhr and D.-S. Kim, "Identification of the Snake Venom Substance That Induces Apoptosis," *Biochemical and Biophysical Research Communications*, vol. 224, no. 1, pp. 134–139, Jul. 1996, doi: 10.1006/bbrc.1996.0996.
- [35] L. Lavín de Juan, V. García Recio, P. Jiménez López, T. Girbés Juan, M. Córdoba-Díaz, and D. Córdoba-Díaz, "Pharmaceutical applications of lectins," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 42, pp. 126–133, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jddst.2017.05.018.
- [36] S. Sarray, N. Srairi, J. Luis, J. Marvaldi, M. E. Ayeb, and N. Marrakchi, "Lebecetin, a C-Lectin Protein from the Venom of *Macrovipera lebetina* That Inhibits Platelet Aggregation and Adhesion of Cancerous Cells," *PHT*, vol. 31, no. 3–6, pp. 173–176, 2001, doi: 10.1159/000048060.
- [37] E. Rivas Mercado et al., "Disintegrins extracted from totonacan rattlesnake (*Crotalus totonacus*) venom and their anti-adhesive and anti-migration effects on MDA-MB-231 and HMEC-1 cells," *Toxicology in Vitro*, vol. 65, p. 104809, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.tiv.2020.104809.
- [38] B. Akhtar, F. Muhammad, A. Sharif, and M. I. Anwar, "Mechanistic insights of snake venom disintegrins in cancer treatment," *European Journal of Pharmacology*, vol. 899, p. 174022, May 2021, doi: 10.1016/j.ejphar.2021.174022.
- [39] K. J. McClellan and K. L. Goa, "Tirofiban," *Drugs*, vol. 56, no. 6, pp. 1067–1080, Dec. 1998, doi: 10.2165/00003495-199856060-00017.
- [40] R. M. Scarborough, "Development of eptifibatide," *American Heart Journal*, vol. 138, no. 6, pp. 1093–1104, Dec. 1999, doi: 10.1016/S0002-8703(99)70075-X.
- [41] E. E. N. Castro et al., "Serpientes Venenosas en México: Una Revisión al Estudio de los Venenos, los Antivenenos y la Epidemiología," *Revista Latinoamericana de Herpetología*, vol. 3, no. 2, Art. no. 2, Nov. 2020, doi: 10.22201/fc.25942158e.2020.2.205.
- [42] T. Mohamed Abd El-Aziz, A. G. Soares, and J. D. Stockand, "Snake Venoms in Drug Discovery: Valuable Therapeutic Tools for Life Saving," *Toxins*, vol. 11, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/toxins11100564.

Cómo citar este artículo:

Jimenez Canale, J., Velazquez Contreras, E. F., & Sarabia Sainz, A.- i. (2022). El potencial farmacológico de venenos de serpientes de Sonora, México. *EPISTEMUS*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.226>

Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar

Agricultural soils and heavy metals, a toxic relationship that can be remedied

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Luis Antonio Loyde De La Cruz¹

Blanca González Méndez²

Ana Martha Cruz Avalos³

René Loredo Portales⁴

Recibido: 13 / 06 / 2022

Aceptado: 11 / 11 / 2022

Publicado: 07 / 12 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>

Autor de Correspondencia:

Rene Loredo Portales

Correo: r.loredo@ugto.mx

Resumen

El suelo es un componente esencial de nuestro planeta, principalmente por que participa en diversos procesos que hacen posible la vida en la Tierra. Uno de los papeles más conocidos es proveer alimentos, debido a que del suelo depende más del 95% de la producción mundial de alimentos. Sin embargo, la contaminación de los suelos es una amenaza constante, ya que los suelos no se consideran un recurso renovable y por ello es necesario remediarlos. Los metales pesados son un contaminante frecuente que pone en riesgo el equilibrio natural de los procesos del suelo y constituyen una amenaza para la salud humana. En este sentido, existen diversas propuestas remediales que buscan removerlos e inmovilizarlos. Algunas de ellas consisten en técnicas biológicas y fisicoquímicas, las cuales utilizan plantas (fitorremediación); asimismo existen otras que usan tratamientos térmicos (desorción térmica), respectivamente.

Palabras clave: suelos agrícolas, metales pesados, remediación.

Abstract

Soil is an essential component of our planet, mainly because it participates in various processes that make life possible in Earth. One of the most important roles is to provide food, due to more than 95% of the world's food production depend on the soil. However, soil contamination is a constant threat, since soils are not considered as a renewable resource; therefore, it is necessary to remedy them. Heavy metals are a frequent contaminant that endangers the natural balance of soil processes and constitutes a threat to human health. In this regard, there are remediation techniques that seek to remove and immobilize them. Some of these techniques are the biological and physicochemical ones, which use plants (phytoremediation), and others use thermal treatments (thermal desorption), respectively.

Keywords: agricultural soils, heavy metals, remediation techniques.

¹ Pasante, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México, lloyde1800@alumno.ipn.mx, 0000-0003-2958-4882.

² Doctora en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, CONACyT Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, Sonora, México, blancagm@geologia.unam.mx, 0000-0002-9601-5906.

³ Doctora en Biociencias, Departamento de Agronomía, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México, am.cruz@ugto.mx, 0000-0003-3950-4241.

⁴ Doctor en Química, Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México, r.loredo@ugto.mx, 0000-0003-0493-4532.



LA IMPORTANCIA DEL SUELO

Seguramente y de manera casi intuitiva sabremos responder a las siguientes preguntas ¿Por qué los suelos son importantes para nosotros? y ¿Cómo es que estos se contaminan? Para entenderlo mejor, este trabajo resume un caso particular y muy relevante para la población; los suelos agrícolas contaminados con metales pesados. Al final del escrito podremos además de responder estas preguntas, una más importante ¿Es posible descontaminar los suelos?

Antes de entrar en el tema central, recordemos ¿Qué son los suelos? y ¿Por qué son tan importantes para nosotros? Algunas definiciones incluyen: el suelo es un medio poroso que se forma en la superficie de la tierra como resultado de los procesos de meteorización; es decir, de la desintegración y la transformación de las rocas y sedimentos sometidos a la acción de la lluvia, el viento, la radiación solar y la actividad de los organismos durante el tiempo [1]. El suelo es un cuerpo natural, que consiste en capas compuestas de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua [2]. El suelo es el resultado de la interacción del clima, los organismos y la topografía que contribuyen al intemperismo de las rocas a través del tiempo.

La formación del suelo es un proceso complejo, y lento ya que se requieren entre 400 y 1000 años para la formación de 1 cm de suelo, es por ello por lo que los suelos también se consideran como un recurso no renovable y en lenta evolución [2].

El suelo es importante ya que es uno de los compartimientos esenciales de nuestro planeta, como la hidrosfera, la biosfera y la atmósfera. El suelo regula diferentes procesos que hacen posible la vida en la tierra, por ejemplo: regula el clima, es un hábitat para los organismos, regula las inundaciones, participa en la retención de carbono, tiene un papel importante en la purificación del agua y la reducción de contaminantes del suelo; de igual manera es el soporte de nuestra infraestructura, es fuente de fibras, combustibles, fármacos y alimentos [3]. Aunque la lista de los papeles que juega el suelo en la Tierra es larga, para la humanidad uno de los roles más importantes del suelo es suministrar alimentos, ya que alrededor del 95% de la

producción mundial de alimentos depende del suelo. En este rol, el suelo proporciona los micronutrientes y macronutrientes esenciales, oxígeno, agua y el sostén donde se desarrollan las raíces de las plantas que se utilizarán para producir alimentos. La demanda de alimentos es tan importante y continúa creciendo tanto que se estima que actualmente la tercera parte de la superficie de la tierra se utiliza para la agricultura [4] (figura 1).

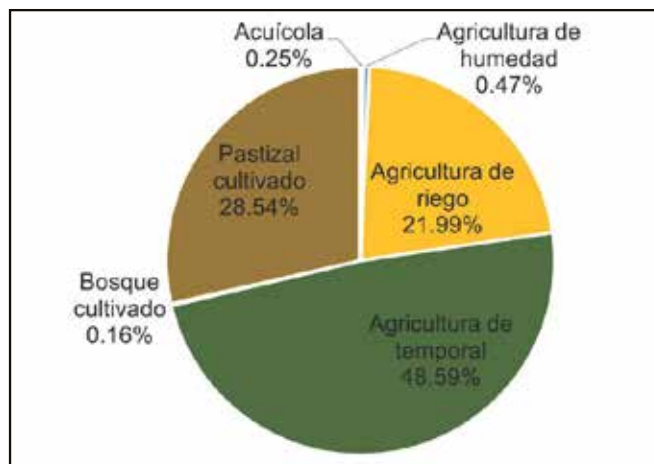


Figura 1. Porcentaje de los diferentes usos del suelo para la producción de alimentos. Elaboración propia: Luis Antonio Loyde de la Cruz [5].

Debido principalmente a las actividades humanas los suelos pueden contaminarse con una amplia variedad de compuestos químicos, son ejemplos, los ácidos, los plaguicidas y los metales pesados (MP). El término MP (aunque comienza a estar en desuso), normalmente nos refiere fácilmente a un número de elementos de conocida toxicidad, entre ellos podemos recordar fácilmente al arsénico (As), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), etc. En específico para los suelos agrícolas, la presencia de MP en altas concentraciones -más allá de las que se consideran naturales- puede provocar toxicidad a los organismos del suelo, incluyendo a los cultivos disminuyendo la calidad y la producción agrícola (tabla 1).

LA LLEGADA DE LOS METALES PESADOS A LOS SUELOS AGRÍCOLAS

Los MP están presentes en los suelos de forma natural, de hecho, la principal fuente natural de MP es la corteza terrestre quien provee el material parental -la roca que durante el tiempo geológico se va fragmentando hasta formar el suelo-. En este sentido, el material parental meteorizado, determina la mezcla de minerales que predominan en los suelos y que son la principal fuente de nutrientes y también de MP disponibles para las plantas y los organismos del suelo [5]. Sin embargo, en algunos sitios también pueden ocurrir anomalías naturales, es decir, se presentan altas concentraciones de ciertos MP y sus compuestos, que pueden degradar y contaminar los suelos. Esto ocurre por



ejemplo en zonas de yacimientos minerales o en zonas con presencia de actividad volcánica, en donde como resultado de los procesos de erosión naturales, se pueden encontrar zonas mineralizadas [6].

Aunque los suelos que se emplean en la agricultura pueden acumular MP de forma natural (a lo cual se le llama concentración de fondo o cero), la fuente más importante es consecuencia de las actividades antropogénicas (humanas). En el caso de los suelos agrícolas, las actividades que tienen mayor importancia son: 1) la aplicación de fertilizantes, pesticidas y lodos residuales, 2) el riego con aguas residuales y 3) la presencia de residuos mineros [7] (tabla 1).

Tabla 1. Principales metales pesados presentes en los suelos agrícolas, intervalos naturales (mg·kg⁻¹) y fuentes antropogénicas

Elemento	Rango natural (mg·kg ⁻¹)	Fuentes antropogénicas
Arsénico (As)	5–10	Actividades mineras, cenizas de combustión, fertilizantes, pesticidas y herbicidas
Cadmio (Cd)	0.01–0.7	Actividades mineras, fertilizantes fosfatados y lodos residuales
Cromo (Cr)	5-3000	Actividades mineras, fertilizantes fosfatados, y lodos residuales
Cobre (Cu)	2-100	Actividades mineras, disposición de desechos y lodos residuales
Mercurio (Hg)	0.003–4.6 (µg·kg ⁻¹)	Actividades mineras, combustión de carbón y riego con aguas residuales
Níquel (Ni)	10–100	Combustión de carbón y riego con aguas residuales
Plomo (Pb)	2–200	Actividades mineras, deposición atmosférica, y fertilizantes
Zinc (Zn)	10–300	Actividades mineras, cenizas industriales, fertilizantes, y lodos residuales

Elaboración propia: Luis Antonio Loyde de la Cruz [7].

La aplicación de fertilizantes, lodos residuales y el riego con aguas residuales en los suelos agrícolas tiene su fundamento; ya que su aplicación permite tener una mejor producción agrícola al agregar nutrientes a los cultivos, como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), los cuales usualmente son escasos en los suelos y por ello limitan el crecimiento adecuado de las plantas. También, se suelen adicionar pesticidas para eliminar las plagas que merman la producción agrícola. Sin embargo, todas estas sustancias -que se aplican frecuentemente en los suelos- suelen contener pequeñas cantidades (algunos miligramos por cada kilogramo) de Cd, flúor (F), Hg, Pb, As, níquel (Ni) y zinc (Zn), entre otros. Esto es muy importante, ya que México ocupa el segundo lugar entre los países que usan aguas residuales para el riego de suelos agrícolas y la aplicación de fertilizantes y pesticidas se encuentra pobremente regulada, pues en algunos países el uso de ciertos plaguicidas que aún se emplean en México se encuentran restringidos. Lo anterior, por considerarlos altamente peligrosos para el medio ambiente y la salud humana. Además, los pesticidas y fertilizantes pueden alterar el suelo, principalmente modificando el pH, promoviendo su degradación química y afectando a los organismos del suelo [7].

Otra fuente de MP la constituye, la presencia de residuos de la minería y en concreto los jales o relaves mineros. Los jales mineros, son los residuos que quedan de los procesos químicos y mecánicos empleados para extraer los minerales de interés, como el oro (Au)



y la plata (Ag). Estos desechos contienen MP en el orden de miligramos por cada kilogramo y constituyen partículas finas (algunas de alrededor de 2.5 micras), que pueden dispersarse fácilmente al medio circundante por acción del viento o del agua. De hecho, un escenario común es la presencia de jales mineros aledaños a suelos agrícolas ya que ambos se suelen encontrar en las cercanías de los ríos y arroyos en donde los jales mineros, en la mayoría de los casos, constituyen pilas de toneladas de material (figura 2). Cuando los MP llegan a los suelos agrícolas desde los jales mineros se producen procesos de meteorización (como aquellos que dan origen a la formación del suelo) y se pueden integrar al suelo y a los cultivos, deteriorando por un lado los suelos agrícolas y por el otro representando un riesgo a la salud para los consumidores de los cultivos contaminados.

Figura 2. Presencia de jales mineros aledaños a suelos agrícolas en la comunidad de San Felipe de Jesús, Sonora. Fotografía de Rene Loredó Portales.



consecuencias de los mp en los suelos agrícolas

Aunque no existen estudios claros sobre la cantidad de suelos agrícolas afectados por MP, se estima que cerca del 44.9% de los suelos en México, presentan evidencias de degradación de los cuales el 17.8% se encuentran afectados por degradación química, que incluye la contaminación por MP. Se considera un suelo contaminado con MP a aquel que presenta concentraciones de uno o algunos elementos por encima del intervalo que se considera natural. En principio, el suelo puede actuar como un filtro de estos contaminantes, reteniéndolos y evitando que se incorporen en cuerpos de agua. Pero cada suelo tiene diferente capacidad para filtrar contaminantes, esto quiere decir que habrá desde algunos con alta capacidad, hasta otros con nula capacidad para filtrarlos. Adicionalmente, cuando

estos se encuentran en altas concentraciones pueden ser una causa de problemas, en especial por que no pueden ser degradados o destruidos como otros contaminantes, por lo que se acumulan progresivamente.

La presencia de altas concentraciones de MP en los suelos agrícolas interrumpen muchos de sus procesos naturales; por ejemplo, pueden producir un cambio en el pH del suelo y en la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y en consecuencia pueden afectar negativamente el crecimiento de los cultivos e incluso llevarlos a la muerte, afectando la producción agrícola y la calidad de los cultivos. La disponibilidad de estos está condicionada a valores de pH bajos, por lo que en los suelos ácidos suelen ocurrir las mayores afectaciones relacionadas con su presencia.

Además, los MP pueden pasar del suelo a los cultivos, provocando fitotoxicidad y acumulándose en sus tejidos (bioacumulación), desde donde pueden llegar posteriormente a los animales, afectando su salud. Existe también la posibilidad de acumulación de algunos de ellos, por ejemplo, en la leche de las vacas que los seres humanos consumen posteriormente. Al igual que en los suelos, los MP pueden interrumpir o entorpecer las reacciones bioquímicas que ocurren en nuestro cuerpo y causar toxicidad. Los efectos son variables y dependen del tipo de elemento, su cantidad y la frecuencia de su consumo y pueden ir desde enfermedades gastrointestinales hasta el desarrollo de cáncer.

Estos problemas suelen agravarse en suelos agrícolas que practican la agricultura de manera intensiva y sin periodos de descanso ni rotación de cultivos [8], prácticas que son cada vez más comunes debido al crecimiento de la demanda de alimentos en este mundo de población creciente.

Solución: Remediación de suelos agrícolas

Está claro que la contaminación de suelos agrícolas con MP es un problema creciente, en principio porque no





es posible abrir nuevas tierras al cultivo y aunado a la creciente demanda alimenticia, es necesario implementar estrategias para remediar su degradación.

La remediación solo debe aplicarse en casos muy puntuales; ya que debe estudiarse con detalle el sitio afectado para determinar las necesidades de remediación y con ello optimizar el uso de los recursos. En el caso de los suelos contaminados con MP, las estrategias de remediación se centran en su remoción y/o en su inmovilización, es decir, disminuir su concentración a aquellas aceptables y/o transformarlos químicamente en compuestos que no sean solubles bajo ciertas condiciones ambientales (como ocurre al contacto con el agua de lluvia o de riego). Esto en principio mejora la calidad del suelo, evita que causen afectaciones y se integren a los cultivos y se disminuyen los riesgos asociados a su toxicidad.

Las técnicas de remediación para suelos (incluyendo los agrícolas) afectados por la contaminación con MP se dividen en fisicoquímicas y biológicas. Las técnicas fisicoquímicas, son más variadas y populares, debido a que implican procesos regularmente simples enfocados en su descontaminación e inmovilización de MP, que suelen tener resultados rápidos y requieren en el mejor de los casos un mantenimiento simple; aunque suelen tener altos costos de inversión y de mantenimiento, ya que pueden implicar el uso de maquinaria sofisticada o estructuras para tratar los suelos agrícolas.

Por otro lado, las técnicas biológicas implican el uso de plantas o microorganismos, que mediante procesos naturales extraen o inmovilizan los MP. Algunos de estos procesos incluyen la formación de especies insolubles (ej. sustancias químicas que liberan las raíces y que se unen a los MP), o la adsorción de los MP en sus tejidos, por lo que en este caso se suelen utilizar plantas que normalmente no son comestibles y están adaptadas a las condiciones locales, para evitar su transferencia a las cadenas alimenticias.

Algunos de los procesos fisicoquímicos más comunes incluyen: 1) reemplazamiento de suelo, 2) lavado de suelos, 3) desorción y tratamiento térmico y 4) remediación electroquímica.

En el reemplazamiento de suelo, el suelo contaminado se remueve y es reemplazado por suelo no contaminado. Aunque el suelo removido debe ser tratado, y se le debe dar una disposición final -ya sea reutilizándolo o confinándolo- de acuerdo con su grado de contaminación. Por otro lado, el lavado de suelo aprovecha las propiedades de algunos MP y sus compuestos, que son solubles y pueden "lavarse". La solución de lavado puede ser agua o algún otro químico que permita solubilizar, dispersar o desorberlos de los suelos.

La desorción térmica aprovecha que algunos MP y sus compuestos son volátiles a ciertas temperaturas, por ejemplo, el Hg. Para esto se utiliza vapor, microondas o radiación infrarroja; donde los suelos se calientan por encima de 300 °C (aunque esta técnica en particular es más efectiva para volatilizar contaminantes orgánicos). Si se emplean, por ejemplo, temperaturas por encima de 1600 °C, la materia orgánica del suelo es eliminada y la masa que se forma, después de que el suelo se enfría, forma rocas vítreas en las que los contaminantes quedan atrapados (inmovilizados); posteriormente estas rocas vítreas pueden emplearse, como materiales de construcción. Otras metodologías más sofisticadas incluyen la aplicación de un gradiente de potencial eléctrico (una diferencia de corriente), empleando electrodos que se insertan en el suelo. Esto provoca que los iones metálicos (cargados positiva o negativamente) migren desde los suelos a los electrodos y los recubran, como cuando se croman objetos. Esta técnica además de remover los MP también permite recuperarlos [9] (Figura 3).



Figura 3. Esquema de algunos métodos de tratamiento de suelos mediante proceso fisicoquímicos. Elaboración propia: Luis Antonio Loyde de la Cruz [9].

Por otro lado, las metodologías de remediación biológica incluyen: 1) fitorremediación, 2) biorremediación y 3) adición de biomateriales.

La fitorremediación, utiliza plantas generalmente no comestibles y locales, aprovechando la habilidad de algunas de ellas para acumular MP en sus tejidos (fitoex-



tracción) o inmovilizarlos en sus raíces (fitoestabilización) o incluso volatilizarlos a través de sus hojas (fitovolatilización). La biorremediación emplea microorganismos, como bacterias y hongos, que pueden provocar cambios químicos en los MP y sus compuestos, como parte de su metabolismo y disminuir con ello su solubilidad. Otra alternativa más reciente, es la aplicación de biomateriales, que constituyen materiales que se producen a partir de la pirolisis (descomposición mediante calor a temperaturas de alrededor de 500 °C) de residuos biológicos (desechos de alimentos, huesos animales, desechos de cultivos, entre otros) [9;10]. Este proceso genera materiales porosos, con propiedades principalmente adsorbentes que permiten inmovilizar a los MP y sus compuestos sobre su superficie. Además, se postula como una tecnología de remediación sustentable ya que aprovecha los residuos orgánicos como materia prima.

CONCLUSIONES

Está claro que el cuidado de los suelos es primordial para la población, ya que nos proveen de muchos servicios, además son fuente de la mayoría de nuestros alimentos y son un recurso no renovable porque su proceso de formación requiere cientos de años.

De todos los usos que se le da al suelo, la agricultura es la más importante ya que cerca de la tercera parte de la superficie de la tierra se utiliza para ello. Una de las amenazas que disminuyen la calidad de los suelos agrícolas y afectan los cultivos, es la presencia de metales pesados. Estos elementos tienen diversos orígenes; en su mayor parte se acumulan en los suelos como consecuencia de actividades humanas (ej. presencia de residuos de la minería y aplicación de agroquímicos). Aunque estas consecuencias dependen mucho del tipo de metal y la cantidad en la que se encuentren.

En México, se estima que cerca del 17.8% de los suelos se encuentran afectados por la degradación química (incluyendo la presencia de metales pesados). Para resolver esta problemática, existen una amplia gama de procesos de remediación que se pueden aplicar para recuperarlos.

Estos procesos buscan removerlos del suelo (extraerlos) o inmovilizarlos en el suelo (volverlos insolubles). Sin embargo, muchos de estos procesos son complejos y costosos -como los tratamientos fisicoquímicos-, aunque algunos de ellos pueden mostrar resultados relativamente a corto plazo, poseen algunos efectos secundarios como: pérdida de suelo (remoción, incineración o solidificación) y pérdida de actividad biológica. Por otro lado, los tratamientos biológicos son menos costosos y amigables con el medio ambiente, aunque sus resultados suelen ser a largo plazo. Así, las técnicas de remediación siguen investigándose y se espera que la diversidad de organismos y materiales biológicos disponibles marquen la evolución para la mejora de su efectividad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Sposito, The chemistry of soils. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2008. ISBN: 978-0-19-531369-7
- [2] "All definitions, FAO SOILS PORTAL, Food and Agriculture Organization of the United Nations". <https://www.fao.org/soils-portal/about/all-definitions/en/> (accedido el 6 de junio de 2022).
- [3] A.P. Eldor, Soil microbiology, ecology, and biochemistry. 4th ed. Amsterdam: Academic Press, Elsevier inc., 2015. ISBN: 978-0-12-415955-6
- [4] H. Burbano-Orjuela, "The soil and its relationship with ecosystem services and food security", Rev. sci. agric., Vol. 33, no. 2, pp.117-124, December 2016. DOI: 10.22267/rcia.163302.58.
- [5] B.J. Alloway, Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 1st ed. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7.
- [6] S.M. Ghandi y B.C. Sarkar, Geochemical Exploration en Essentials of Mineral Exploration and Evaluation. 1st ed. Amsterdam: Elsevier inc., 2016, pp. 125-158. ISBN: 978-0-12-805332-4.
- [7] R. Nieder, D.K. Benbi y F.X. Reichl, Role of Potentially Toxic Elements in Soils en Soil Components and Human Health, 1st ed. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2018, pp. 375-450. DOI: 10.1007/978-94-024-1222-2.
- [8] J.D. Mahecha-Pulido, J.M. Trujillo-González y M.A. Torres-Mora, 2015, "Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región in the meta departmet", ORINOQUIA, vol. 19, no. 1, pp. 118-122.
- [9] L. Lianwen, L. Wi, S. Weiping, G. Mingxin, 2018, "Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability", Sci. Total Environ., vol. 633, no. 1, pp. 206-219. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
- [10] N. Siebers y Peter Leinweber, 2013, "Bone Char: A Clean and Renewable Phosphorous Fertilizer with Cadmium Immobilization Capability", J. Environ. Qual., vol. 42, no. 1, pp. 405-411. DOI: 10.2134/jeq2012.0363.

Cómo citar este artículo:

Loyde de la Cruz, L. A., González Méndez, B., Cruz Avalos, A. M., & Loredó Portales, R. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. EPISTEMUS, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>

Catalizadores de tres vías: historia, funcionamiento y ventajas ambientales

Three-way catalysts: history, performance and environmental advantages

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Sofía Navarro-Espinoza¹Diana Meza-Figueroa²Martín Pedroza-Montero³Diego Soto-Puebla⁴

Recibido: 15 / 08 / 2022

Aceptado: 24 / 11 / 2022

Publicado: 08 / 12 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.240>

Autor de Correspondencia:

Sofía Navarro-Espinoza

Correo: sofia.navarro@unison.mx

Resumen

El catalizador de tres vías es una herramienta utilizada para reducir la emisión de gases contaminantes liberados por el motor de combustión interna de un automóvil. Este trabajo tiene como objetivo proporcionar una comprensión del funcionamiento e importancia de los catalizadores de tres vías. Se presenta una descripción general de la evolución histórica de su desarrollo, hasta llegar a la formulación y estructura de los catalizadores actuales. Además, se describe su funcionamiento a nivel molecular y las condiciones de operación que aseguran su eficiencia de conversión. Discutimos las ventajas al medio ambiente y a la salud humana que acompañan su uso adecuado. Por último, se remarca la importancia de su reemplazo oportuno.

Palabras clave: catalizadores, Contaminación atmosférica, Emisión de gases, Tráfico vehicular.

Abstract

Three-way catalyst is a tool used to reduce the emission of pollutant gases released by an automobile's internal combustion engine. This paper aims to provide an understanding of the operation and the importance of the three-way catalyst. A general description of the historical evolution of their development, up to the formulation and structure of current catalysts, is presented. In addition, their operation at the molecular level and the operating conditions that ensure their conversion efficiency are described. We discuss the advantages to the environment and human health that come along with their proper use. Finally, the importance of their timely replacement is highlighted.

Keywords: atmospheric pollution, Gas emissions, Vehicular traffic.

¹ Sofía Navarro-Espinoza, Departamento de Ciencia Químico-Biológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, sofia.navarro@unison.mx. 0000-0003-2727-2164

² Diana Meza-Figueroa, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, diana.meza@unison.mx. 0000-0002-8934-0321

³ Martín Pedroza-Montero, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, martin.pedroza@unison.mx. 0000-0003-4190-6477

⁴ Diego Soto-Puebla, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, diego.soto@unison.mx. 0000-0003-3604-1421.



INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los parámetros más importantes que afectan la calidad de vida y la salud de la población en comunidades urbanas. Con el objetivo de garantizar una buena calidad del aire, los gobiernos de todo el mundo han adoptado una serie de medidas cada vez más exigentes para frenar su contaminación [1]. En específico, se ha prestado especial atención a las emisiones de los vehículos de motor. Los automóviles funcionan con gasolina, la cual está compuesta por hidrocarburos. Cuando el combustible de hidrocarburo se quema con el oxígeno del aire, se libera una gran cantidad de energía. Sin embargo, debido a que la gasolina contiene alrededor de 150 compuestos químicos diferentes, genera más que solo energía: también produce contaminación (figura 1). Los principales contaminantes son gases como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ha implementado normas que indican los requisitos de emisiones

gaseosas para vehículos y motores, con el fin de mejorar la calidad del aire. Los estándares de emisiones para vehículos livianos se establecieron por primera vez en 1988 y entraron en vigor en 1993 (NOM-042-ECOL-1993 y NOM-042-ECOL-1993). Posteriormente, se actualizaron con la publicación de la NOM-042-SEMARNAT-2003 que brinda una opción de cumplimiento con los estándares basados en el sistema regulatorio de los EE. UU. y el sistema europeo, pasando de los estándares Euro 3 y 4. Esta regulación está en vigor desde 2004 y actualmente establece los límites máximos permisibles de emisión CO, HC y NOx por vehículos de pasajeros (hasta 3,857 kilogramos), que usan gasolina, gas natural, gas licuado de petróleo o diésel (tabla 1) [2]. Se define como vehículo de pasajeros a cualquier automóvil con capacidad de hasta 10 personas. En la tabla 1 se muestra la clasificación en donde A: Vehículos año modelo 2004 y posteriores, B: Vehículos año modelo 2007 y posteriores, C: Vehículos al año calendario en el cual se apliquen los límites máximos permisibles.

Tabla 1: Límites máximos permisibles de emisión para vehículos de pasajeros que funcionan con gasolina o diésel establecidos en la NOM-042-SEMARNAT-2003.

Vehículo de pasajeros	Ejemplo	CO (g/km)		HC (g/km)		NO _x (g/km)	
		Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
A	Nissan Sentra 2004	2.11		0.156		0.25	0.62
B	Volkswagen Jetta 2009	2.11		0.099		0.249	
C	SUV Toyota Rav4 2022	2.11		0.047		0.068	



Debido al incremento de la población y la cantidad de vehículos, las regulaciones son cada vez más exigentes. Por tal motivo, se han desarrollado tecnologías avanzadas de tratamiento de emisiones para vehículos de gasolina, lo que puede ayudar a reducir la contaminación asociada a tráfico vehicular a pesar del aumento de los viajes en automóvil. El uso del catalizador de tres vías (CTV) es una estrategia importante para disminuir los gases de escape como CO, HC y NOx [3]. A continuación, se profundiza en la formulación histórica y actual de los CTV y se investiga la química catalítica que tiene lugar a nivel molecular; así como las ventajas ambientales que ofrecen estos dispositivos.



Figura 1. Emisión de gases tóxicos por el tubo de escape de un vehículo de pasajeros en una zona urbana.
Imagen obtenida de [wired.com/story/think-ride-sharing-is-good-for-the-planet-not-so-fast/](https://www.wired.com/story/think-ride-sharing-is-good-for-the-planet-not-so-fast/)

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE LOS CATALIZADORES DE TRES VÍAS

Los catalizadores se introdujeron a inicios de los 70's para cumplir con la normativa de control de emisiones de vehículos con motor [4]. Los primeros catalizadores se conocían como convertidores catalíticos de dos vías, ya que oxidaban el CO y los HC transformándolos en CO₂ y vapor de agua (H₂O). La conversión de estos dos gases se abordó con el uso de platino y paladio, que demostraron ser muy activos y estables para la oxidación. Inicialmente, la reducción de NOx se llevó a cabo de forma no catalítica mediante un sistema mecánico denominado "recirculación de los gases de escape". Los gases ricos en H₂O, CO₂ y N₂, se reincorporaban a la primera fase del ciclo de combustión (etapa de admisión) para mezclarse con el aire de aspiración. Esto aumentaba la capacidad calorífica y disminuía la temperatura máxima alcanzada. De esta manera la cantidad de NO se reducía, ya que a mayor temperatura se generan más óxidos de nitrógeno [4]. Posteriormente, la investigación sobre materiales catalíticos condujo al descubrimiento del rodio (Rh) como un excelente catalizador reductor de NOx. En 1980, la introducción del Rh proporcionó al convertidor catalítico la capacidad de reducir también los NOx dando lugar al llamado catalizador de tres vías [5]. Estos elementos activos (Pt, Pd y Rh) se esparcieron en un soporte cuida-

dosamente fabricado con un material altamente capaz de almacenar oxígeno, para moderar los cambios rápidos de las estequiometrías de escape ricas o pobres en oxígeno. El componente de almacenamiento adsorbe el exceso de oxígeno presente y lo libera para la ejecución de las reacciones químicas. El primer material utilizado fue CeO₂, que presenta la característica de que cada átomo de O₂- libre crea un espacio y produce dos cationes Ce³⁺ mediante la distribución de electrones a dos cationes Ce⁴⁺ [6]. Sin embargo, a pesar de sus excelentes propiedades de almacenamiento de oxígeno, el uso de CeO₂ puro se descartó porque es poco termoestable y sufre sinterización a altas temperaturas, perdiendo así sus características cruciales de almacenamiento y liberación de este elemento [7]. En consecuencia, la actividad de investigación en los años 90's se centró en la mejora de la estabilidad de la superficie del soporte de CeO₂. Entre los diferentes sistemas estudiados, el ZrO₂ parecía ser el estabilizador térmico más eficaz, especialmente cuando forma un óxido mixto con CeO₂. Los primeros trabajos incorporaron ZrO₂ en la superficie de los CTV de forma descontrolada, principalmente por impregnación, obteniendo resultados poco favorecedores. Posteriormente, se encontró que la forma adecuada de añadir ZrO₂ es generando una solución sólida entre el CeO₂ y el ZrO₂ [8]. También, se investigó la estabilidad térmica de los óxidos mixtos CeO₂ ± ZrO₂ soportados sobre Al₂O₃ y se demostró que una mayor proporción de ZrO₂ puede evitar que el CeO₂ disperso reaccione con el Al₂O₃, mejorando así la estabilidad de los CTV [9]. Como puede observarse, los CTV han evolucionado tras años de investigación hasta su formulación actual para asegurar una mayor eficiencia. A continuación, se describen las características y el funcionamiento de los CTV de uso vigente.

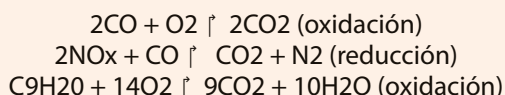
Principios de funcionamiento de los catalizadores de tres vías actuales

El diseño actual de estos dispositivos consiste en una carcasa de acero que protege dos monolitos de cordierita sintética (2MgO-2Al₂O₃-5SiO₂), material que exhibe una baja expansión térmica y resistencia al agrietamiento por choques térmicos durante cambios rápidos de tempera-





tura. La estructura interna de cerámica está organizada en un sistema de canales similar a un panal de abejas, resultando en una mayor superficie de interacción entre los gases tóxicos y la superficie catalítica [10]. La superficie del CTV está recubierta con platinoides (Pt, Pd y Rh) encargados de acelerar las reacciones de conversión (figura 2). Los platinoides ayudan a acelerar una reacción química, sin ser agotados u oxidados. Un catalizador actúa generando un estado de transición diferente y una menor energía de activación para la formación de productos. Por lo tanto, las colisiones moleculares tienen la energía necesaria para alcanzar el estado de transición. En consecuencia, los catalizadores permiten el transcurso de reacciones que de otro modo estarían bloqueadas o desaceleradas por una barrera cinética [11]. Los platinoides son colocados sobre una solución sólida de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CeO}_0.2\text{ZrO}_0.8\text{O}_2$. Este compuesto se caracteriza por poseer la capacidad de liberar y almacenar oxígeno de forma reversible por la fluctuación de los estados de oxidación de los cationes. La alta capacidad de almacenar oxígeno es debido a la facilidad con la que los iones de Ce pueden reducirse de Ce^{4+} a Ce^{3+} tras la formación de vacantes de oxígeno. El catión Zr^{4+} aumenta la capacidad de almacenar oxígeno debido a la distorsión de la red cristalina. Una buena capacidad de almacenamiento de oxígeno es importante, ya que este elemento es esencial para que se lleven a cabo las siguientes reacciones redox de conversión.



El oxígeno necesario para formar la mezcla con combustible y que eventualmente alcanza el CTV se toma del aire atmosférico. El CTV es mucho más eficiente convirtiendo CO, HC y NO_x cuando la relación de aire/combustible es estequiométrica (14.6/1). Además, esta proporción evita que el CTV se impregne de gasolina no quemada y se dañe. El aire se introduce a través del filtro en el colector de admisión y se dosifica mediante la válvula de mariposa. Por otro lado, llega el combustible, que dentro del colector de admisión se une al aire y esta mezcla es enviada al cilindro. El llenado de los cilindros se produce por aspiración mientras la válvula de admisión está abierta. Para lograr que el

motor funcione a una relación aire/combustible de 14.6/1 se utiliza un sensor que detecta la presencia de oxígeno (sonda lambda). De esta manera, si el sensor detecta una alta proporción de O, envía una señal al sistema de inyección para enriquecer la mezcla inyectando más combustible. Contrariamente, si la mezcla contiene mayor cantidad de combustible, el sensor detecta la ausencia de oxígeno y envía una orden al sistema de inyección para que reduzca la cantidad de combustible utilizado. Los gases de escape resultantes de la explosión de la mezcla en las cámaras de combustión se canalizan a través de colectores y pasan por tres fases antes de ser expulsados (figura 3). En la fase 1, ocurre la unión de los gases de cada cilindro en un único colector. La fase 2, consiste en la reorganización molecular de las especies gaseosas a través del CTV. Finalmente, en la fase 3 los gases resultantes pasan a través de un resonador y las ondas sonoras producidas con cada explosión se mitigan en un silenciador. El proceso de conversión por catálisis transcurre en la fase 2, cuando CO, NO_x e HC atraviesan los canales del CTV e interactúan con su superficie. El primer bloque del CTV contiene mayor cantidad de Pt y Rh, por lo que las moléculas de NO_x son las primeras en reaccionar, generando átomos libres de N que se combinan para formar N₂. Las moléculas del gas pasan al segundo bloque con concentraciones mayores de Pt y Pd; así las moléculas de HC y CO se unen con O- para formar CO₂ y vapor de agua. Las tres reacciones químicas se llevan a cabo a altas temperaturas, lo que se traduce en una deficiencia importante en el diseño moderno del CTV, pues la conversión de gases es nula durante el arranque en frío (que se presenta en los minutos iniciales del viaje del vehículo) [10]. En ese sentido, los CTVs dependen de las temperaturas elevadas proporcionadas por el motor para cumplir su función de manera óptima. Así, a una temperatura de operación alta (hasta 800°C) y con la cantidad adecuada de oxígeno, el porcentaje de conversión de los gases de escape oscila entre el 90 y el 99.9 % [12].

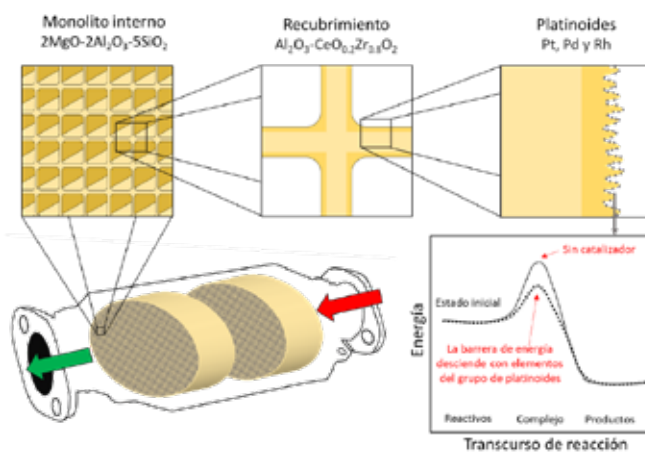


Figura 2. Estructura interna de un catalizador y gráfico de la participación de los platinoides en la disminución de energía de transición para la formación de productos durante el transcurso de una reacción (catálisis).

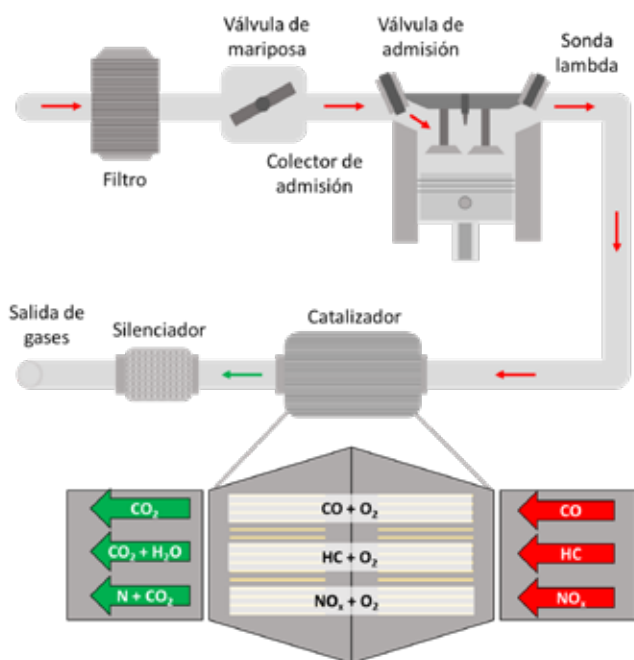


Figura 3. Diagrama esquemático del recorrido de gases en el sistema de escape.

BENEFICIOS PARA EL MEDIO AMBIENTE Y LA SALUD HUMANA

Sin el uso de los catalizadores de tres vías los gases de escape de los vehículos se liberarían directamente a la atmósfera. Como se mencionó previamente, en los motores de gasolina el proceso de combustión genera tres contaminantes principales: CO, HC y NOx. Estos gases tienen un impacto grave e irreversible tanto en la salud humana como en los ecosistemas [12]. El monóxido de carbono, generado por el calor del motor durante el trabajo realizado, es un gas altamente venenoso, insípido, inodoro e incoloro. La exposición a este gas afecta el suministro de oxígeno a órganos y tejidos del cuerpo, lo que puede provocar la

muerte. El envenenamiento por CO causa dolor de cabeza, dolor en el pecho, debilidad, náuseas, vómitos, y altera el estado mental [13]. Por otro lado, los hidrocarburos no quemados son residuos de la gasolina y su incorporación a la atmósfera genera nubes dañinas de smog fotoquímico; además, algunos compuestos de HC producen irritación en los ojos, daño pulmonar y asma [14]. Por último, el óxido de nitrógeno se forma al combinar oxígeno y nitrógeno a altas temperaturas. Este gas es responsable de generar smog fotoquímico y lluvia ácida. En humanos, se vincula a una amplia gama de problemas respiratorios, como por ejemplo tos y dolor de garganta [15].

La emisión de estos tres gases se minimiza sustancialmente mediante el uso de convertidores catalíticos [3]. Se ha demostrado que la intensidad de las emisiones de los vehículos ha disminuido en factores de 2 a 100 durante las últimas décadas para cumplir con los estándares regulatorios. Los vehículos con CTV operando con la proporción de aire y combustible cercana a la estequiométrica y a una temperatura adecuada emiten una menor cantidad de estos tres gases, en comparación con los vehículos de gasolina sin convertidor catalítico (tabla 2) [12].

Tabla 2. Emisiones de CO, NOx y HC provenientes de un automóvil sin y con catalizador de tres vías (modificada de [12]).

Gas de escape	Sin catalizador de tres vías (g/km)	Con catalizador de tres vías (g/km)
CO ₂	1.8	0.3
NO _x	0.00346	0.00068
HC	1.56	0.22

Los beneficios del uso del catalizador son claros. Sin embargo, el diseño del proceso de combustión en es-





tos vehículos genera un envejecimiento y, por tanto, una pérdida de eficiencia [16]. Además, su sobreuso produce niveles elevados de emisión de materia particulada como platinoides y óxido de zirconia [16, 17], por lo que se recomienda su reemplazo oportuno.

IMPORTANCIA DE SU USO Y REEMPLAZO

Un convertidor catalítico es uno de los dispositivos de tratamiento de gases de escape más efectivos. Sin embargo, al igual que cualquier otra pieza automotriz, puede dañarse o volverse menos eficiente. Las razones de la pérdida de eficiencia de conversión pueden incluir mezclas de aire/combustible no adecuadas, bujías y sensores de oxígeno defectuosos, y sincronización incorrecta del motor. Los CTV también pueden obstruirse total o parcialmente debido a fugas de anticongelante y aceite causadas por sellos de válvulas dañados, juntas defectuosas y pistones desgastados. Adicionalmente, algunos elementos químicos presentes en los aditivos de las gasolinas se pueden incorporar a la superficie catalítica [18]. En algunos casos, las unidades convertidoras se sobrecalientan derritiendo la estructura interna de panal [19]. Por otra parte, el empuje a alta presión del flujo de gases y el golpeteo generado por el mal estado de calles y carreteras puede producir su desintegración, liberando la capa catalizadora a la atmósfera [16]. En ese sentido, el sobreuso de un catalizador más allá de su vida útil producirá no solo la emisión de gases tóxicos, sino también de material particulado que igualmente tiene un efecto negativo sobre la salud y el medio ambiente [16, 19]. Los vehículos con un CTV dañado consumen

más gasolina, expulsan humo con mal olor por el escape y pueden tener fallas mecánicas en el motor, generando un impacto económico. El motor depende del flujo eficiente de los gases de escape para funcionar a un nivel óptimo. Los bloqueos en el convertidor catalítico pueden restringir el flujo de gases, afectando su rendimiento. Finalmente, la acción más eficaz para solucionar los problemas relacionados con los convertidores catalíticos es reemplazar las unidades más antiguas por otras nuevas. La vida útil de este componente varía entre los diferentes fabricantes y el uso, aunque suele estar entre 100.000 y 120.000 kilómetros. Para alargar la vida útil de los catalizadores al máximo se recomienda mantener en buen estado diversos elementos del motor como las bujías, el filtro de aire y el sensor de oxígeno.

CONCLUSIONES

Los convertidores catalíticos de tres vías son esenciales para reducir la emisión de gases de los vehículos con motor de gasolina a niveles reglamentarios. Su función es importante en términos ambientales ya que disminuyen hasta un 99% las emisiones de CO, HC y NOx. Su formulación y diseño actuales influyen en su rendimiento y eficiencia de conversión de gases. Sin embargo, su uso prolongado genera transformaciones en la composición original, causando la pérdida de sus propiedades catalíticas. Sumado a esto, el sobreuso de los CTVs conlleva al desgaste estructural y la posterior liberación de partículas sólidas. Por lo tanto, se recomienda su reemplazo oportuno para evitar la emisión de gases tóxicos y de material particulado a la



atmósfera. Finalmente, este trabajo es una guía útil para obtener una mejor comprensión del funcionamiento de los convertidores catalíticos como dispositivos esenciales para la disminución de la contaminación ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TransportPolicy.net. "Topics: Emissions standards." (Revisado el 14 de agosto del 2022).
- [2] A. M. D. L. I. AUTOMOTRIZ, A. G. D. D. FEDERAL, G. D. E. DE MEXICO, and P. F. D. P. AL AMBIENTE, "NOM-042-SEMARNAT-2003: Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Emisión de Hidrocarburos Totales o no Metano, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrógeno y Partículas Provenientes del Escape de los Vehículos Automotores Nuevos Cuyo Peso Bruto Vehicular no Exceda los 3,857."
- [3] S. Dey and N. S. Mehta, "Automobile pollution control using catalysis," *Res Environ Sustain*, vol. 2, p. 100006, 2020/12/01/2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2020.100006>.
- [4] R. J. Farrauto, M. Deeba, and S. Alerasool, "Gasoline automobile catalysis and its historical journey to cleaner air," *Nature Catalysis*, vol. 2, no. 7, pp. 603-613, 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0312-9>.
- [5] L. Hegedus and J. C. Summers, "Platinum-rhodium catalyst for automotive emission control," ed: Google Patents, 1978.
- [6] S. Dey and G. C. Dhal, "Cerium catalysts applications in carbon monoxide oxidations," *Mat Sci Energy Technol*, vol. 3, pp. 6-24, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.09.003>.
- [7] B. M. Reddy, A. Khan, P. Lakshmanan, M. Aouine, S. Lorient, and J.-C. Volta, "Structural characterization of nanosized CeO₂-SiO₂, CeO₂-TiO₂, and CeO₂-ZrO₂ catalysts by XRD, Raman, and HREM techniques," *J Phys Chem B* vol. 109, no. 8, pp. 3355-3363, 2005, doi: <https://doi.org/10.1021/jp045193h>.
- [8] T. Montini, M. Melchionna, M. Monai, and P. Fornasiero, "Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials," *Chem Rev*, vol. 116, no. 10, pp. 5987-6041, 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00603>.
- [9] M. Yao, R. Baird, F. Kunz, and T. Hoost, "An XRD and TEM investigation of the structure of alumina-supported ceria-zirconia," *J Catal* vol. 166, no. 1, pp. 67-74, 1997, doi: <https://doi.org/10.1006/jcat.1997.1504>.
- [10] V. Gupta, K. Chaturvedi, M. Dubey, and N. M. Rao, "Catalytic converters for treatment of exhaust gas emission in automobiles: a review," *Int J Scient Eng Res*, vol. 8, no. 2, pp. 95-99, 2017.
- [11] R. Zanella, "Aplicación de los nanomateriales en catálisis," *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, vol. 7, no. 12, pp. 66-82, 2014.
- [12] E. Kritsanaviparkorn, F. M. Baena-Moreno, and T. R. Reina, "Catalytic converters for vehicle exhaust: fundamental aspects and technology overview for newcomers to the field," *Chemistry*, vol. 3, no. 2, pp. 630-646, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/chemistry3020044>.
- [13] C. Mattiuzzi and G. Lippi, "Worldwide epidemiology of carbon monoxide poisoning," *Hum Exp Toxicol*, vol. 39, no. 4, pp. 387-392, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0960327119891214>.
- [14] K. Sun, Y. Song, F. He, M. Jing, J. Tang, and R. Liu, "A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics," *Sci Total Environ*, vol. 773, p. 145403, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403>.
- [15] B. P. Barrick, U. Jain, and M. M. Herr, "Environmental and health impacts of nitrous oxide in current medical practice," *ASA Monitor*, vol. 84, no. 4, pp. 22-25, 2020.
- [16] D. Meza-Figueroa, M. Pedroza-Montero, M. Barboza-Flores, S. Navarro-Espinoza, R. Ruiz-Torres, A. Robles-Morúa, F. Romero, B. Schiavo, B. González-Grijalva, and M. Acosta-Elias, "Identification of refractory zirconia from catalytic converters in dust: An emerging pollutant in urban environments," *Sci Total Environ*, vol. 760, p. 143384, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143384>.
- [17] M. Omrani, M. Goriaux, Y. Liu, S. Martinet, L. Jean-Soro, and V. Ruban, "Platinum group elements study in automobile catalysts and exhaust gas samples," *Environ Poll*, vol. 257, p. 113477, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113477>.
- [18] S. Y. Christou, S. García-Rodríguez, J. L. G. Fierro, and A. M. Efstathiou, "Deactivation of Pd/CeO₂/ZrO₂ model three-way catalyst by P, Ca and Zn deposition," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 111, pp. 233-245, 2012.
- [19] S. Navarro-Espinoza, D. Meza-Figueroa, R. Guzmán, A. Duarte-Moller, H. Esparza-Ponce, F. Paz-Moreno, B. González-Grijalva, O. Álvarez-Bajo, B. Schiavo, D. Soto-Puebla, and M. Pedroza-Montero, "Release of Nanoparticles in the Environment and Catalytic Converters Ageing," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 12, p. 3406, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/nano11123406>.

Cómo citar este artículo:

Navarro Espinoza, S., Meza Figueroa, D. M., Pedroza Montero, M. R., & Soto-Puebla, D. (2022). Catalizadores de tres vías: historia, funcionamiento y ventajas ambientales. *EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.240>



Recientes aplicaciones de la fluorescencia de la clorofila en los cultivos vegetales

Recent Applications of Chlorophyll Fluorescence in Vegetable Crops

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Adalberto Benavides-Mendoza¹
Nazario Francisco-Francisco²

Recibido: 10 / 12 / 2022

Aceptado: 09 / 01 / 2023

Publicado: 27 / 01 / 2023

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.285>

Autor de Correspondencia:
Nazario Francisco-Francisco

Correo: nazariof.francisco@uttehuacan.edu.mx

Resumen

La producción de los cultivos agrícolas ante el cambio climático es un tema de interés actual. En años recientes se han observado los efectos negativos de los factores bióticos y abióticos en su productividad. En este sentido, el esclarecimiento de los mecanismos de tolerancia que emplean las plantas hacia los diversos factores de estrés debe perfilarse como estrategia para generar cultivares y sistemas de producción resilientes. La medición de la fluorescencia de la clorofila es una forma rápida y no destructiva de entender la sensibilidad de las plantas a los diversos factores. El presente artículo de revisión, conjunta información científica, en torno a los efectos de los factores abióticos y bióticos cambiantes que actualmente se registran en la fluorescencia de la clorofila de las plantas cultivadas. Se analiza la utilidad de los parámetros de fluorescencia como indicadores de los mecanismos de adaptación y las tendencias futuras de su uso.

Palabras clave: clorofila a, cambio climático, fitopatógenos.

Abstract

The production of agricultural crops facing climate change is a topic of current interest. In recent years, the negative effects of biotic and abiotic factors on its productivity have been observed. In this sense, the clarification of the tolerance mechanisms that plants use towards the various stress factors should be outlined as a strategy to generate cultivars and resilient production systems. The measurement of chlorophyll fluorescence is a fast and non-destructive way to understand the sensitivity of plants to various factors. This article reviews jointly scientific information about the effects of changing abiotic and biotic factors that are currently reported on the chlorophyll fluorescence of vegetable crops. The utility of fluorescence parameters as indicators of adaptation mechanisms and future trends in their use are analyzed.

Keywords: chlorophyll a, climate change, phytopathogens.

¹ PhD, Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo 25315, Coahuila, México. ORCID 0000-0002-2729-4315 Correo electrónico: abenmen@gmail.com

² Dr. en Ciencias, Departamento de Agricultura Sustentable y Protegida, Universidad Tecnológica de Tehuacán, prolongación de la 1 sur No. 1101, San Pablo Tepetzingo, Tehuacán, Puebla. México. ORCID 0000-0001-5367-1631. Correo electrónico: nazariof.francisco@uttehuacan.edu.mx

INTRODUCCIÓN

La actividad fotosintética que mantiene el flujo energético de la biosfera ha sido motivo de muchos estudios. Algunas se basan en la medición de la eficiencia fotoquímica con la cual los organismos fotosintéticos capturan la energía de la radiación electromagnética y la transforman en energía bioquímica almacenada y utilizada por las células [1]. Dichas mediciones se obtienen con equipos denominados fluorómetros los cuales miden la fluorescencia de la clorofila en hojas individuales o en las plantas enteras [2]. Los fluorómetros son equipos diseñados para la emisión y detección de longitudes de onda de radiación que son absorbidas y reemitidas por los pigmentos de los organismos que llevan a cabo fotosíntesis oxigénica; tales como cianobacterias, algas, y plantas vasculares [3]. Con el análisis de las características de la radiación reemitida por los pigmentos fotosintéticos puede determinarse la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR); la disminución en la EUR generalmente ocurre por un estado de estrés. El estrés causa daño oxidativo en las membranas de los cloroplastos [4], lo cual causa cambios en las características de la radiación reemitida por los pigmentos fotosintéticos. Estos cambios son detectados por el fluorómetro.

Los ajustes en el aparato fotoquímico son resultado de los cambios ambientales y pueden ser cuantificados con los fluorómetros desde etapas muy tempranas del estrés. Por lo tanto, es posible monitorear el proceso y conocer su tendencia en el tiempo. Se ha demostrado con éxito que mediante la medición de la fluorescencia de la clorofila es posible determinar los niveles de estrés por déficit hídrico en las plantas [5],[6], por temperaturas extremas [7], por salinidad [8], la toxicidad por metales [9], e incluso afectaciones por factores bióticos [10].

No obstante, siguen siendo escasos los reportes que explican los usos y alcances de las lecturas en los fluorómetros para el estudio e interpretación del estrés en los cultivos agrícolas afectados por el cambio climático. La presente revisión tiene como propósito mostrar los parámetros de fluorescencia que se registran durante el estrés ocasionado por los factores bióticos y abióticos en las plantas cultivadas.

¿Qué es la fluorescencia?

Como sabemos, la fotosíntesis de las plantas terrestres es un proceso que se realiza en los cloroplastos. Las membranas de los cloroplastos contienen clorofilas y carotenoides que son los pigmentos responsables de absorber la radiación electromagnética que llamamos luz. Los pigmentos se asocian con proteínas especializadas y forman estructuras llamadas "antenas" y "centros de reacción", que se encuentran en complejos supramoleculares denominados fotosistemas I y II (FI y FII en la figura 1). Las antenas son complejos de pigmentos clorofílicos y carotenoides organizados espacialmente por proteínas llamadas Complejos Cosechadores de Luz de los fotosistemas (CCLI y CCLII en la figura 1) que absorben radiación de longitud de onda entre 400 y 700 nm. La actividad fotosintética comienza con la captura de la energía lumínica por las antenas y la transferencia de la energía a los centros de reacción de los fotosistemas I y II. En condiciones de baja luminosidad y en ausencia de estrés, el proceso fotoquímico ocurre con alta eficiencia. Sin embargo, bajo alta intensidad lumínica o bajo condición de estrés el proceso se vuelve menos efi-



Figura 1. Esquema simplificado del proceso de transporte de electrones que sucede en la membrana tilacoidal de las plantas. FII: Fotosistema II, CCLII: Complejo Cosechador de Luz II, Cit b/f: Citocromo del tipo b y f, FI: Fotosistema I, CCLI: Complejo Cosechador de Luz I, PC: Plastocianina, PQ: Plastoquinona, ATP: Adenosin Trifosfato, NADP: Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato (P). La adición del ión H⁺ simboliza la reducción de las moléculas. Modificado de Baker y Rosenqvist [11].





Cuando los fotones son absorbidos por las antenas de los CCL, cada fotón deja de existir como tal y se transforma en una cuasipartícula denominada excitón. Un excitón ocurre cuando la energía del fotón se transforma en un estado energizado transitorio de los electrones de una molécula. Los excitones son de vida muy corta y deben de ser transferidos rápidamente a los centros de reacción P680 y P700 del FII y FI (figura 2). En los centros de reacción la energía contenida en el excitón es transformada en energía contenida en los enlaces de una molécula reducida; es decir, pasa de ser un fenómeno físico transitorio (excitón) a adoptar una forma bioquímica estable en un compuesto de tipo quinona (PQ en la figura 1). Durante la transferencia de electrones entre los fotosistemas, la quinona reducida transfiere su electrón a través del complejo de citocromos b y f y al fotosistema I para generar la Nicotinamida Adenina Dinucleotido Fosfato reducida (NADPH) utilizado en la reducción de CO₂ [11]. Como bien sabemos, el ATP (Adenosín Trifosfato) se obtiene de la operación de la ATP sintasa que usa el gradiente de concentración de protones entre el lumen del tilacoide y el estroma del cloroplasto para transformar el ADP (Adenosín Difosfato) en ATP (figura 1).

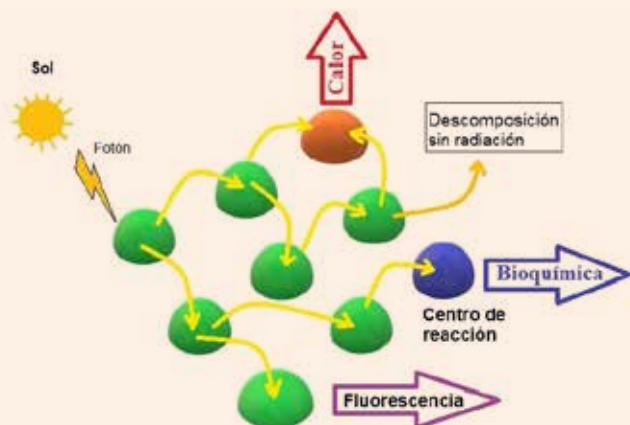


Figura 2. Flujo de la energía desde el momento en que son captados los fotones provenientes del sol, el paso a través de las antenas, y las posibles vías de desexcitación. La vía bioquímica se refiere a los procesos tales como la reducción del NADP, el ciclo de Calvin, la respiración, entre otros.

¿Pero qué pasa si los excitones no son transferidos rápidamente a los centros de reacción? Esta situación ocurre en condiciones de alta luminosidad o en presencia de estrés. Lo que ocurre en estos casos es que, los excitones se transforman nuevamente en fotones de longitud de onda mayor a la del fotón original y son reemitidos por el aparato fotoquímico. La transformación de los excitones en fotones puede producir radiación térmica (calor) o lo que se llama fluorescencia, que se define como la emisión de radiación visible por parte de una sustancia que ha absorbido previamente radiación electromagnética de longitud de onda menor (figura 2).

Mientras mayor sea la magnitud de emisión de calor o fluorescencia por el aparato fotosintético menor será su eficiencia en transformar la energía de la luz en potencial reductor almacenado en una molécula. Por lo tanto, el uso de un fluorómetro puede indicarnos la eficiencia del proceso fotoquímico y el impacto que las diferentes condiciones ambientales tienen sobre la eficiencia.

Los fluorómetros de reciente generación, son equipos portátiles que cuentan con adaptadores herméticos de un diámetro inferior a 1 pulgada. Estos adaptadores son colocados al aparato foliar para su adaptación a la obscuridad. Cuando células vegetales adaptadas a la obscuridad son irradiadas, la fluorescencia de la clorofila a muestra una compleja cinética de inducción llamada curva de Kautsky. Dicha curva se caracteriza por una serie de inflexiones en la tasa de ascenso en el nivel de fluorescencia llamado la transiente OJIP; cada letra denota una inflexión distinta en la curva de inducción [12]. La inducción de la fluorescencia de la clorofila a es registrada por los fluorómetros al momento en que se aplica radiación electromagnética de excitación mediante pulsos a una frecuencia determinada. Cuando los fluorómetros aplican una densidad de flujo fotónico fotosintético (DFFF) menor a 0.1 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, se registra un mínimo rendimiento de la fluorescencia de la clorofila (F_0). En este momento todos los centros de reacción se encuentran completamente oxidados. Cuando al mismo tejido se le aplica un corto pulso de luz actínica de muy alta DFFF ($>6000 \mu\text{mol} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), se genera un máximo nivel de fluorescencia (F_m) por la reducción completa de los centros de reacción. La diferencia entre F_m y F_0 se denomina fluorescencia máxima variable (F_v).

De aquí puede estimarse el rendimiento cuántico máximo (F_v/F_m) [13]. Este parámetro representa la eficiencia máxima al cual la radiación absorbida por los pigmentos antena del fotosistema II es convertido a energía química.

Cuando el tejido foliar se adapta a un período de luz, el aparato fotoquímico pasa gradualmente del estado adaptado a la oscuridad, al estado adaptado a la luz. En la cinética de inducción de la fluorescencia podrá observarse que existe un punto de estabilización (F_s) denominado estado estable (figura 3). La aplicación del pulso de radiación saturante permitirá observar el rendimiento máximo de la fluorescencia de la clorofila en el estado adaptado a la luz (F_m'). A la diferencia entre F_m' y F_s se le denomina F_q' . Con este parámetro puede estimarse el rendimiento cuántico efectivo (F_q'/F_m'). La F_q'/F_m' es ampliamente usado para estimar la tasa de transporte de electrones (ETR) [13].

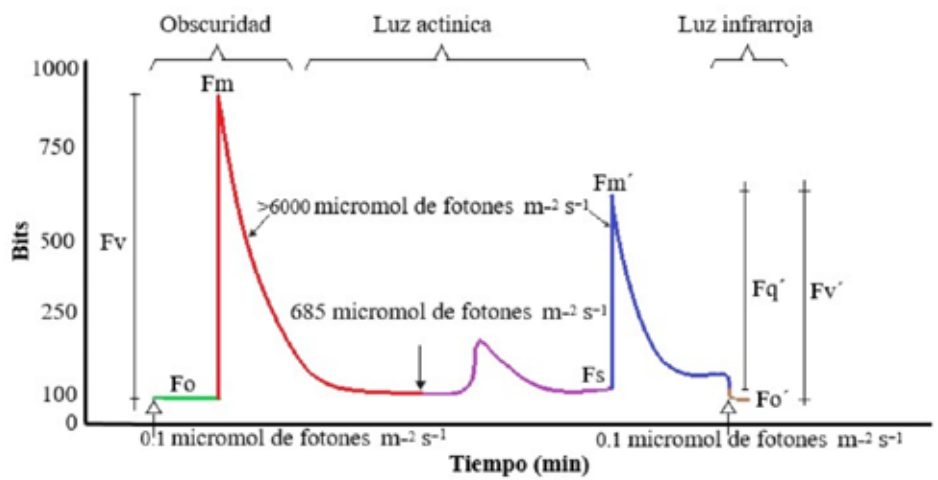
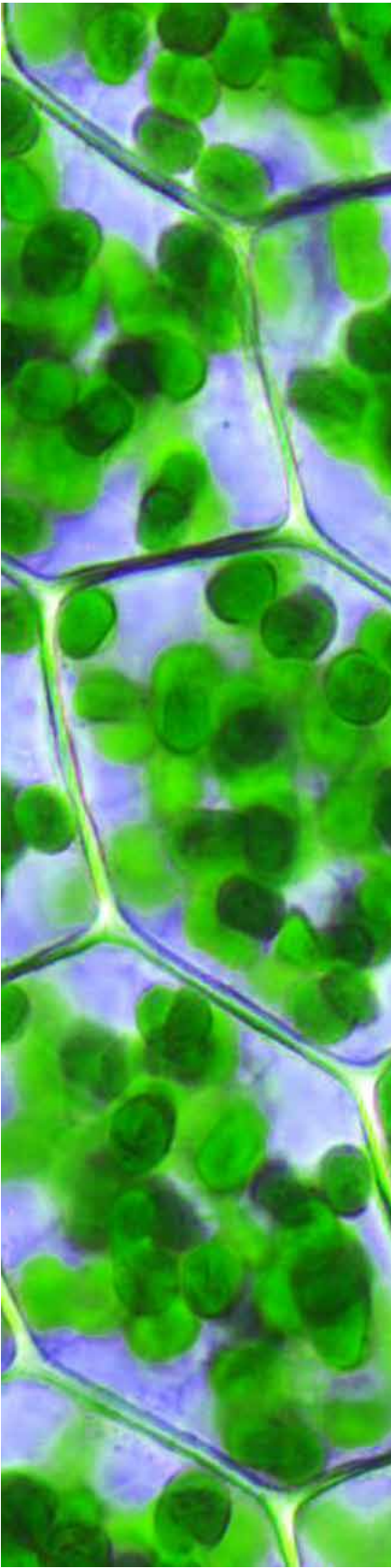


Figura 3. Cinética de inducción de la fluorescencia de la clorofila ‘a’ que se obtiene con los fluorómetros comerciales. F_o : Fluorescencia mínima adaptada a la oscuridad; F_m : Fluorescencia máxima adaptada a la oscuridad; F_v : Fluorescencia variable; F_s : Estado estable adaptado a la luz; F_m' : Fluorescencia máxima adaptada a la luz; F_o' : Fluorescencia mínima adaptada a la luz; F_v' : Fluorescencia variable adaptada a la luz. Modificado de Rohacek, [13].

Los parámetros que se obtienen de ambas condiciones de adaptación se usan ampliamente para estimar otros parámetros de fluorescencia importantes, estos son: la eficiencia máxima del fotosistema II dada una condición de luz (F_v/F_m') y los declives en el rendimiento cuántico debidas a procesos fotoquímicos (qP) y no fotoquímicos (qN o NPQ). La F_v/F_m' se obtiene considerando un mínimo nivel de fluorescencia (F_o') cuando los centros del fotosistema II están altamente oxidados dada una condición de luz. La F_o' puede calcularse u obtenerse aplicando luz rojo lejano débil en ausencia de luz actínica [11]. Un resumen de los parámetros que se obtienen mediante el proceso fotoquímico se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de uso común en la detección del estrés biótico y abiótico. Para más detalles puede revisarse Rohacek [13].

Parámetros de la fluorescencia de la clorofila.	Siglas	Fórmula
Rendimiento cuántico máximo del PSII	F_v/F_m	$(F_m - F_o)/F_m$
Rendimiento cuántico efectivo del PSII	F_q'/F_m'	$(F_m' - F_s)/F_m'$
Declive fotoquímico	qP	$(F_m' - F_s)/(F_m' - F_o)$
Declive no fotoquímico	NPQ	$(F_m - F_m')/(F_m - F_o)$





Aplicación de los parámetros de fluorescencia en las plantas cultivadas

El estrés hídrico es el factor abiótico limitante más estudiado en la productividad de los cultivos y el cambio climático global está aumentando la frecuencia de las condiciones de estrés hídrico. El estrés hídrico ha sido asociado con una disminución en varios procesos bioquímicos tales como: la tasa fotosintética, absorción iónica, respiración, metabolismo del carbono y disminución en el crecimiento de las plantas [14]; la afectación en el crecimiento de las plantas expuestas al estrés hídrico es continuo y se encuentra estrechamente ligada a futuros rendimientos del cultivo [15]. La medición de los parámetros de fluorescencia en las plantas sometidas a estrés hídrico ha facilitado información valiosa para determinar los límites de resistencia de los cultivos a este factor limitante. Entre los parámetros estudiados, se ha encontrado que el rendimiento cuántico efectivo, el declive fotoquímico (qP), y el coeficiente de declive fotoquímico disminuyen, mientras que los parámetros no fotoquímicos (NPQ) tienden a aumentar; en plántulas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) sometidas a estrés por sequía, el contenido de osmoreguladores como la prolina aumenta significativamente [16]. Yang y colaboradores, encontraron que el incremento en el parámetro NPQ registrado en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) sometidas a condiciones de estrés hídrico se debe a un mecanismo fotoprotectivo [17], mientras que la disminución en el rendimiento cuántico efectivo ocasionado por este factor ha sido relacionado a un daño en las membranas tilacoidales o los centros de reacción [18]. Como una consecuencia del cambio climático global, la frecuencia, la intensidad y duración de la sequía está en aumento y actualmente se encuentra en niveles alarmantes. Si bien se han logrado avances significativos en el entendimiento de las respuestas de algunas plantas cultivadas a este factor, se requieren más estudios de los parámetros de fluores-

cencia que den indicios de la adaptación de las plantas al estrés hídrico.

La salinidad es otro de los factores abióticos más limitantes de la productividad. Muchos cultivos son sensibles a la alta concentración de sales en el suelo. Los efectos adversos de la salinidad son el resultado de una compleja interacción entre los procesos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos; involucrados en la germinación de las semillas, crecimiento vegetal y la toma de nutrientes [19]. Los ensayos de fluorescencia de la clorofila en las plantas sometidas a la salinidad han mostrado que el transporte de electrones es el parámetro más sensible, lo que indica la inactivación de los centros de reacción del fotosistema II. Una disminución en el rendimiento cuántico máximo (F_v/F_m) del FII en respuesta a la sal fue reportado para *Portulaca oleracea*, una planta suculenta que se ha usado en la medicina popular [20], y en cultivos que se siembran a campo abierto como el maíz [21]. Los parámetros de fluorescencia han facilitado una rápida y precisa medición del nivel de tolerancia al estrés por salinidad de ocho genotipos de cebada [22]; lo que sin duda favorece la planeación en la plantación de los cultivos en zonas con este problema. El parámetro (F_v'/F_m') también registra sensibilidad en las plantas de trigo afectadas por salinidad [23], sin embargo, son escasos los estudios que analizan el comportamiento de este parámetro. Los parámetros de la fluorescencia de la clorofila se usan actualmente como herramienta base para seleccionar especies ornamentales para paisajes áridos [24]. Más recientemente, con la técnica de la fluorescencia de la clorofila, se ha demostrado que la adición de nitrógeno a las plantas de avena en medio salino alivia los efectos negativos de la salinidad [25]. Lo anterior, muestra las utilidades de la medición de la fluorescencia de la clorofila como medio para determinar las respuestas instantáneas de las plantas para mitigar los efectos adversos de la salinidad; sin embargo, aún es incipiente la cantidad de plantas que se han estudiado con este propósito.

En concordancia con la salinidad, la presencia de metales pesados en los suelos agrícolas es otro de los factores que cada vez más afectan a los cultivos. Los suelos contaminados con metales pesados disminuyen la productividad agrícola, ya que los metales tóxicos entran en los tejidos de las plantas con los nutrientes desde el suelo; ocasionando una reducción en el área foliar y el crecimiento. Estos cambios se acompañan de la reducción en la respiración y la fotosíntesis [26]. Entre las estrategias para disminuir este problema, se ha practicado la fitorremediación; lo anterior se logra mediante el empleo de plantas con alta capacidad de absorción de metales pesados. Mediante la técnica de la fluorescencia de la clorofila se ha progresado en la selección correcta de las especies más resistentes a este factor. Por ejemplo, mediante el registro del rendimiento cuántico máximo en plantas de *Festuca arundinacea* se determinó que su tolerancia se encuentra en el rango de concentración 4 a 20 mg L⁻¹ de los metales Aluminio y Fluoruro [27], lo cual permite su selección como planta conservadora

de suelos. Dezhban y colaboradores, encontraron que la medición de la fluorescencia de la clorofila en la especie *Robinia pseudoacacia* como indicador a la tolerancia de los metales cadmio (Cd) y plomo (Pb) resulta efectiva en combinación con la medición del contenido de clorofila y prolina [28]. Las evidencias actuales muestran que la técnica de la fluorescencia de la clorofila en los estudios de fitoremediación es acertada y está facilitando la selección de especies más idóneas para la detoxificación de los suelos.

La temperatura es el factor más estudiado como resultado del calentamiento global. El empleo de la técnica de la fluorescencia de la clorofila ha mostrado utilidad en la determinación de la tolerancia de los cultivos a este factor. Se ha reportado que la estabilidad de las membranas celulares es un determinante clave de la tolerancia de las plantas con metabolismo C3 a este factor [29]. El rendimiento cuántico efectivo ha sido el parámetro más útil para determinar la tolerancia a los extremos de temperaturas de cultivos de tomate [7]. En la propagación de plantas ha sido empleado para examinar los niveles de estrés al que se incurre durante la aclimatación, enraizamiento y trasplante de especies de importancia ornamental [30]. La tolerancia al frío de órganos propagativos de fresa con la técnica de la fluorescencia permitió la determinación de cultivares propicios para zonas frías [31]. El rendimiento cuántico efectivo (F_q'/F_m') es el parámetro que ha mostrado la mayor utilidad en los estudios de las respuestas de las plantas horti-



colas al estrés por temperaturas [32]. Por su parte, el parámetro NPQ ha mostrado utilidad en la determinación del daño por extremos de temperatura en plantas ornamentales [33]. En la última década, el estudio del impacto de las altas temperaturas en las plantas, como resultado directo del calentamiento global, ha cobrado gran interés. No obstante, para garantizar la seguridad alimentaria, será necesario enfocar más estudios de los mecanismos de adaptación a este factor para el desarrollo de cultivares tolerantes.

El aumento en la concentración de CO₂ en el ambiente como detonante del calentamiento global, ha propiciado cambios en la fisiología de las plantas [34]. Varios estudios han sido perfilados para relacionar los parámetros de la fluorescencia de la clorofila con la asimilación de este sustrato. Plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) sometidas a elevadas concentraciones de CO₂ registraron los más altos incrementos en el parámetro F_v/F_m [35]. Así mismo, la tasa de transporte de electrones (ETR) fue correlacionado con la asimilación neta de CO₂ en las plantas C4 y las plantas crasuláceas [36]. En ensayo in vitro se ha observado que la aplicación de altas concentraciones de CO₂ promueve la fotosíntesis en plantas de vid y mejora los procesos fotoquímicos (*Vitis vinífera*), lo cual se manifiesta en una disminución del parámetro F_v/F_m [37]. También, se ha reportado que el suministro elevado de CO₂ a las plantas, alivia los efectos negativos del estrés hídrico; lo cual se ve reflejado en los parámetros de fluorescencia [38]. La técnica de la fluorescencia de la clorofila contribuirá en gran medida en el entendimiento del comportamiento futuro que presentarán las plantas cultivadas ante el calentamiento global.

Por otro lado, como una consecuencia indirecta del calentamiento global, se han postulado cambios en la interacción planta-microorganismo [39]. Varios estudios se están perfilando para entender dicha interacción con la técnica de la fluorescencia de la clorofila. En el caso de los fitopatógenos, la eficiencia cuántica F_v/F_m ha sido el parámetro más sensible. Plantas de crisantemo afectadas por *Fusarium oxysporum* y *Sclerotinia sclerotiorum* mostraron cambios significativos en el parámetro F_v/F_m [40]. La reducción en este parámetro ha sido más notable cuando los síntomas en las plantas afectadas manifiestan clorosis [41]. Aucique-Pérez y colaboradores, mostraron que las plantas de trigo inoculadas con el hongo *Pyricularia oryzae* reducen hasta en 5% el rendimiento cuántico; el silicio (Si) mejoró dicha respuesta como inductor de tolerancia [42]. Este parámetro, también ha sido útil para determinar el nivel de daño por enfermedades virosas como los Potyvirus [43]; sin embargo, no es sensible para la detección presintomática de la enfermedad ocasionada por los virus del grupo



de los Tobamovirus [44]. En plantas de trigo afectadas por roya se encontró que el parámetro (F_o) es un buen indicador en el avance de la enfermedad [45]. En contra parte, las plantas cultivadas inoculadas con microorganismos benéficos, muestran una mejora sustancial en la eficiencia fotoquímica, y por consecuencia una mejora en la eficiencia fotosintética [46]. Estos reportes, dan hincapié al uso de la técnica de la fluorescencia como herramienta para entender la interacción de las plantas con los microorganismos.

Un resumen del comportamiento de los parámetros de fluorescencia ante los factores de estrés más estudiados se presenta en la figura 4.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Si bien se reconoce que los parámetros de la fluorescencia de la clorofila son afectados por casi cualquier factor (figura 3), su utilidad va más allá que la simple cuantificación de los niveles de estrés de las plantas. Actualmente, las mediciones de la fluorescencia son ensayadas con fluorómetros modulados inalámbricos [47], lo que permite el desarrollo de equipos de medición remota. Ello está permitiendo el análisis de la relación de los parámetros de fluorescencia con la productividad de los cultivos, ahora medida desde el espacio [48],[49],[50]. Lo anterior, permitirá predecir el rendimiento de las plantas cultivadas en cualquier estación del año. Además, las técnicas actuales de fenotipificación auxiliadas con la técnica de la fluorescencia de la clorofila, están permitiendo la evolución de la integración de los estudios fotoquímicos con imágenes de fluorescencia multicolor [51]. Esto permitirá adquirir rasgos morfológicos, fisiológicos y patológicos instantáneamente; así como entender su relación con la fotosíntesis y los metabolitos secundarios involucrados [52]. Lo que proporcionará un nuevo medio para promover el progreso en el mejoramiento de cultivos tolerantes a los diversos factores limitantes de su productividad [48]. La técnica de la fluorescencia de la clorofila permitirá entender cómo se adaptarán las plantas cultivadas a los diversos factores de estrés, los cuales se agudizan cada vez más con el cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Stirbet, D. Lazár, J. Kromdijk, and Govindjee, "Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses?," *Photosynthetica*, vol. 56, no. 1, pp. 86–104, Mar. 2018, doi: 10.1007/S11099-018-0770-3.
- [2] M. R. Urschel and T. Pocock, "Remote detection of growth dynamics in red lettuce using a novel chlorophyll a fluorometer," *Agronomy*, vol. 8, no. 10, Oct. 2018, doi: 10.3390/AGRONOMY8100227.
- [3] B. Cremella, Y. Huot, and S. Bonilla, "Interpretation of total phytoplankton and cyanobacteria fluorescence from cross-calibrated fluorometers, including sensitivity to turbidity and colored dissolved organic matter," *Limnol. Oceanogr.*, vol. 16, pp. 881–894, 2018, doi: 10.1002/lom3.10290.

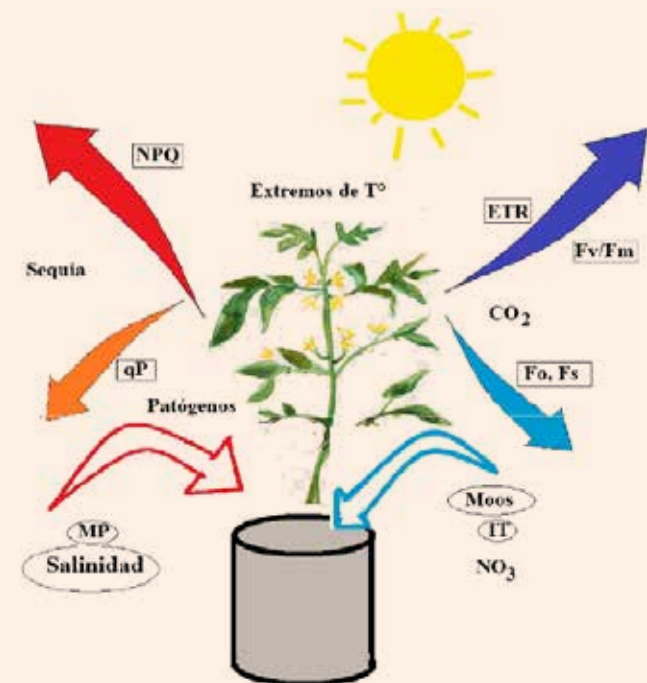


Figura 4. Tendencias de los parámetros principales de la fluorescencia ante los principales factores de estrés vegetal más estudiados. NPK: Declive no fotoquímico; qP: Declive fotoquímico; ETR: Tasa de transporte de electrones; Fv/Fm: Rendimiento cuántico máximo; MP: Metales pesados; Moo: Microorganismos; IT: Inductores de tolerancia.





- [4] S. I. Zandalinas, Y. Fichman, and R. Mittler, "Vascular Bundles Mediate Systemic Reactive Oxygen Signaling during Light Stress," *Plant Cell*, vol. 32, no. 11, pp. 3425–3435, Nov. 2020, doi: 10.1105/TPC.20.00453.
- [5] J. Banks and J. M. Banks, "Identification of Drought Tolerant Amenity Trees," *Environ Exp Bot*, vol. 155, pp. 118–127, 2018, Accessed: Dec. 07, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/335110849>
- [6] B. Liu, J. Liang, G. Tang, X. Wang, F. Liu, and D. Zhao, "Drought stress affects on growth, water use efficiency, gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Juglans rootstocks*," *Sci Hortic*, vol. 250, pp. 230–235, May 2019, doi: 10.1016/J.SCIHORT.2019.02.056.
- [7] R. Zhou et al., "Evaluation of temperature stress tolerance in cultivated and wild tomatoes using photosynthesis and chlorophyll fluorescence," *Hortic Environ Biotechnol*, vol. 4, no. 59, pp. 499–509, Aug. 2018, doi: 10.1007/S13580-018-0050-Y.
- [8] M. Stefanov, E. Yotsova, G. Rashkov, K. Ivanova, Y. Markovska, and E. L. Apostolova, "Effects of salinity on the photosynthetic apparatus of two *Paulownia* lines," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 101, pp. 54–59, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.PLAPHY.2016.01.017.
- [9] Y. Zhang and G. Jian Liu, "Effects of cesium accumulation on chlorophyll content and fluorescence of *Brassica juncea* L.," *J Environ Radioact*, vol. 195, pp. 26–32, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jenvrad.2018.09.017.
- [10] M. L. Pérez-Bueno, M. Pineda, and M. Barón, "Phenotyping Plant Responses to Biotic Stress by Chlorophyll Fluorescence Imaging," *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, Frontiers Media S.A., Sep. 18, 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.01135.
- [11] N. R. Baker and E. Rosenqvist, "Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities," *Journal of Experimental Botany*, vol. 55, no. 403, Oxford University Press, pp. 1607–1621, 2004, doi: 10.1093/jxb/erh196.
- [12] X. G. Zhu, Govindjee, N. R. Baker, E. DeSturler, D. R. Ort, and S. P. Long, "Chlorophyll a fluorescence induction kinetics in leaves predicted from a model describing each discrete step of excitation energy and electron transfer associated with Photosystem II," *Planta*, vol. 223, no. 1, pp. 114–133, Dec. 2005, doi: 10.1007/s00425-005-0064-4.
- [13] K. Roháček, "Chlorophyll Fluorescence Parameters: The Definitions, Photosynthetic Meaning, and Mutual Relationships," *Photosynthetica*, vol. 40, no. 13, pp. 13–29, 2002, doi: 10.1023/A:1020125719386.
- [14] M. F. Seleiman et al., "Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects," *Plants* 2021, Vol. 10, Page 259, vol. 10, no. 2, p. 259, Jan. 2021, doi: 10.3390/PLANTS10020259.
- [15] A. K. Shanker et al., "Drought stress responses in crops," *Functional and Integrative Genomics*, vol. 14, no. 1. Springer Verlag, pp. 11–22, 2014, doi: 10.1007/s10142-013-0356-x.
- [16] Y. K. Shin, S. R. Bhandari, J. S. Jo, J. W. Song, and J. G. Lee, "Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, phytochemical contents, and antioxidant activities in lettuce seedlings," *Horticulturae*, vol. 7, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/horticulturae7080238.
- [17] X. Yang et al., "Photosynthetic Response Mechanism of Soil Salinity-Induced Cross-Tolerance to Subsequent Drought Stress in Tomato Plants," *Plants (Basel)*, vol. 9, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/PLANTS9030363.
- [18] V. K. Dalal and B. C. Tripathy, "Water-stress induced downsizing of light-harvesting antenna complex protects developing rice seedlings from photo-oxidative damage OPEN," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1038/s41598-017-14419-4.
- [19] P. Parihar, S. Singh, R. Singh, V. P. Singh, and S. M. Prasad, "Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no. 6, pp. 4056–4075, Mar. 2015, doi: 10.1007/s11356-014-3739-1.
- [20] H. Hnilickova, K. Kraus, P. Vachova, F. Hnilicka, P. Woodrow, and L. F. Ciarmiello, "Salinity Stress Affects Photosynthesis, Malondialdehyde Formation, and Proline Content in *Portulaca oleracea* L.," *Plants*, vol. 10, p. 845, 2021, doi: 10.3390/plants10050845.
- [21] R. Gholamin and M. Khayatnezhad, "Study of Bread Wheat Genotype Physiological and Biochemical Responses to Drought Stress," *HELIX*, vol. 10, no. 5, pp. 87–92, Oct. 2020, doi: 10.29042/2020-10-5-87-92.
- [22] D. Allel, A. Ben-Amar, and C. Abdelly, "Leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence and ion content of barley (*Hordeum vulgare*) in response to salinity," <https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1385811>, vol. 41, no. 4, pp. 497–508, Feb. 2017, doi: 10.1080/01904167.2017.1385811.
- [23] M. S. Saddiq et al., "Effect of salinity stress on physiological changes in winter and spring wheat," *Agronomy*, vol. 11, no. 6, Jun. 2021, doi: 10.3390/agronomy11061193.
- [24] T. Starman and L. Lombardini, "Growth, Gas Exchange, and Chlorophyll Fluorescence of Four Ornamental Herbaceous Perennials during Water Deficit Conditions," *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 131, no. 4, pp. 469–475, Jul. 2006, doi: 10.21273/JASHS.131.4.469.
- [25] X. Song et al., "Nitrogen Application Improved Photosynthetic Productivity, Chlorophyll Fluorescence, Yield and Yield Components of Two Oat Genotypes under Saline Conditions," *Agronomy* 2019, Vol. 9, Page 115, vol. 9, no. 3, p. 115, Feb. 2019, doi: 10.3390/AGRONOMY9030115.
- [26] M. Shahid et al., "Heavy metal stress and crop productivity," *Crop Production and Global Environmental Issues*, pp. 1–25, Jan. 2015, doi: 10.1007/978-3-319-23162-4_1/COVER.
- [27] J. Fan et al., "Physiological effects induced by aluminium and fluoride stress in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.)," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 231, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.ECOENV.2022.113192.
- [28] A. Dezhban, • A Shirvany, • P Attarod, • M Delshad, • M Matiniazadeh, and • M Khoshnevis, "Cadmium and lead effects on chlorophyll fluorescence, chlorophyll pigments and proline of *Robinia pseudoacacia*," *J For Res (Harbin)*, vol. 26, no. 2, pp. 323–329, 2015, doi: 10.1007/s11676-015-0045-9.
- [29] D. Killi, A. Raschi, and F. Bussotti, "Lipid Peroxidation and Chlorophyll Fluorescence of Photosystem II Performance during Drought and Heat Stress is Associated with the Antioxidant Capacities of C3 Sunflower and C4 Maize Varieties," *International Journal of Molecular Science*, vol. 21, no. 14, p. 4846, 2020, doi: 10.3390/ijms21144846.



- [30] S. E. Bruce, D. B. Rowe, and J. A. Flore, "Chlorophyll Fluorescence and Vegetative Propagation of Taxus," *HortScience*, vol. 36, no. 5, pp. 971–975, Aug. 2001, doi: 10.21273/HORTSCI.36.5.971.
- [31] E. Zareei et al., "Physiological and biochemical responses of strawberry crown and leaf tissues to freezing stress," *BMC Plant Biol*, vol. 21, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2021, doi: 10.1186/S12870-021-03300-2/TABLES/4.
- [32] R. Shahzad et al., "Comparative analysis of two phytochrome mutants of tomato (Micro-Tom cv.) reveals specific physiological, biochemical, and molecular responses under chilling stress," *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, vol. 18, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1186/s43141-020-00091-1.
- [33] J. Miralles-Crespo, J. Antonio Martínez-López, J. Antonio Franco-Leemhuis, and S. Bañ, "Determining Freezing Injury from Changes in Chlorophyll Fluorescence in Potted Oleander Plants," *Wilson and Greaves*, 2011.
- [34] R. Cassia, M. Nocioni, N. Correa-Aragunde, and L. Lamattina, "Climate change and the impact of greenhouse gasses: CO₂ and NO, friends and foes of plant oxidative stress," *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, Frontiers Media S.A., Mar. 01, 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.00273.
- [35] D. R. Taub, J. R. Seemann, and J. S. Coleman, "Growth in elevated CO₂ protects photosynthesis against high-temperature damage," *Plant Cell Environ*, vol. 23, no. 6, pp. 649–656, Jun. 2000, doi: 10.1046/J.1365-3040.2000.00574.X.
- [36] E. van Tongerlo, G. Trouwborst, S. W. Hogewoning, W. van Ieperen, J. A. Dieleman, and L. F. M. Marcelis, "Crassulacean acid metabolism species differ in the contribution of C₃ and C₄ carboxylation to end of day CO₂ fixation," *Physiol Plant*, vol. 172, no. 1, pp. 134–145, May 2021, doi: 10.1111/PPL.13312.
- [37] X. Zhao et al., "Elevated CO₂ concentration promotes photosynthesis of grape (*Vitis vinifera* L. cv. 'Pinot noir') plantlet in vitro by regulating RbcS and Rca revealed by proteomic and transcriptomic profiles," *BMC Plant Biol*, vol. 19, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2019, doi: 10.1186/S12870-019-1644-Y/FIGURES/5.
- [38] X. Liu et al., "Increased CO₂ concentrations increasing water use efficiency and improvement PSII function of mulberry seedling leaves under drought stress," *J Plant Interact*, vol. 14, no. 1, pp. 213–223, Jan. 2019, doi: 10.1080/17429145.2019.1603405.
- [39] M. S. Hunjan and J. S. Lore, "Climate Change: Impact on Plant Pathogens, Diseases, and Their Management," *Crop Protection Under Changing Climate*, pp. 85–100, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-46111-9_4.
- [40] M. Kopacki, A. Wagner, and W. Michałek, "PATHOGENICITY OF *Fusarium oxysporum*, *Fusarium avenaceum* AND *Sclerotinia sclerotiorum* AND THEIR EFFECT ON PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF *CHRYSANTHEMUM* PLANTS," *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, vol. 15, no. 3, pp. 59–70, 2016, Accessed: Dec. 07, 2022. [Online]. Available: www.acta.media.pl

- [41] K. Mandal, R. Saravanan, S. Maiti, and I. L. Kothari, "Effect of downy mildew disease on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Plantago ovata* Forsk. Einfluss des Falschen Mehltaus auf Photosynthese und Chlorophyllfluoreszenz von *Plantago ovata* Forsk," *Journal of Plant Diseases and Protection*, vol. 116, no. 4, pp. 1861–1829, 2009.
- [42] C. E. Aucique-Pérez, P. E. de Menezes Silva, W. R. Moreira, F. M. DaMatta, and F. Á. Rodrigues, "Photosynthesis impairments and excitation energy dissipation on wheat plants supplied with silicon and infected with *Pyricularia oryzae*," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 121, pp. 196–205, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.PLAPHY.2017.10.023.
- [43] L. Wang, S. Poque, and J. P. T. Valkonen, "Phenotyping viral infection in sweetpotato using a high-throughput chlorophyll fluorescence and thermal imaging platform," *Plant Methods*, p. NA-NA, Oct. 2019, Accessed: Dec. 08, 2022. [Online]. Available: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=HRCA&sw=w&issn=17464811&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA604534220&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>
- [44] P. Spoustová, H. Synková, R. Valcke, and N. Čerovská, "Chlorophyll a fluorescence as a tool for a study of the Potato virus Y effects on photosynthesis of nontransgenic and transgenic Pssu-ipt tobacco," *Photosynthetica*, vol. 51, no. 2, pp. 191–201, Jun. 2013, doi: 10.1007/S11099-013-0023-4.
- [45] J. Kuckenberger, I. Tartachnyk, and G. Noga, "Temporal and spatial changes of chlorophyll fluorescence as a basis for early and precise detection of leaf rust and powdery mildew infections in wheat leaves," *Precis Agric*, vol. 10, no. 1, pp. 34–44, Feb. 2009, doi: 10.1007/S11119-008-9082-0.
- [46] B. Y. Samaniego-Gámez, R. Garruña, J. M. Tun-Suárez, J. Kantun-Can, A. Reyes-Ramírez, and L. Cervantes-Díaz, "Bacillus spp. Inoculation improves photosystem II efficiency and enhances photosynthesis in pepper plants," *Chil J Agric Res*, vol. 76, no. 4, pp. 409–416, 2016, doi: 10.4067/S0718-58392016000400003.
- [47] J. Reimer et al., "An autonomous and wireless pulse-amplitude modulated chlorophyll fluorometer," *Technisches Messen*, vol. 88, no. 12, pp. 773–784, Dec. 2021, doi: 10.1515/TEME-2021-0104/MACHINEREADABLECITATION/RIS.
- [48] L. He et al., "Diverse photosynthetic capacity of global ecosystems mapped by satellite chlorophyll fluorescence measurements," *Remote Sens Environ*, vol. 232, p. 111344, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.RSE.2019.111344.
- [49] L. L. Sloat et al., "Evaluating the benefits of chlorophyll fluorescence for in-season crop productivity forecasting," *Remote Sens Environ*, vol. 260, p. 112478, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.RSE.2021.112478.
- [50] G. H. Mohammed et al., "Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress," *Remote Sens Environ*, vol. 231, p. 111177, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.RSE.2019.04.030.
- [51] I. Sperdouli, I. Mellidou, and M. Moustakas, "Harnessing chlorophyll fluorescence for phenotyping analysis of wild and cultivated tomato for high photochemical efficiency under water deficit for climate change resilience," *Climate*, vol. 9, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/cli9110154.
- [52] J. Yao et al., "Phenotyping of Arabidopsis drought stress response using kinetic chlorophyll fluorescence and multicolor fluorescence imaging," *Front Plant Sci*, vol. 9, p. 603, May 2018, doi: 10.3389/FPLS.2018.00603/BIBTEX.

Cómo citar este artículo:

Benavides Mendoza, A., & Francisco Francisco, N. (2022). Recientes aplicaciones de la fluorescencia de la clorofila en los cultivos vegetales. *EPISTEMUS*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.285>

Orujo de uva: Más que un residuo, una fuente de compuestos bioactivos

Grape Pomace: More than a Waste, a Source of Bioactive Compounds

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Madelina López-Astorga ¹
 Claudia Celeste Molina-Quijada ²
 Maribel Ovando-Martínez ³
 Marcos Leon-Bejarano * ⁴

Recibido: 06 / 12 / 2022

Aceptado: 16 / 01 / 2023

Publicado: 31 / 01 / 2023

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.283>

Autor de Correspondencia:
 Marcos Leon-Bejarano
 Correo: leonb.marcos@gmail.com

Resumen

El orujo de uva es el principal subproducto sólido generado durante la elaboración del vino, y es generalmente considerado como un residuo. Sin embargo, la creciente preocupación con respecto al impacto negativo hacia el medio ambiente que supone el mal manejo de los residuos agroindustriales ha incentivado a la búsqueda del manejo o aprovechamiento de los subproductos. En este sentido, diversas investigaciones han demostrado el potencial del orujo de uva como una fuente para la obtención de diversos compuestos bioactivos (compuestos con propiedades biológicas benéficas para el ser humano), que podrían ser aprovechados en la industria alimentaria, cosmética o farmacéutica para beneficio humano. La presente revisión tiene como objetivo dar a conocer información relevante al respecto, con la finalidad de que el orujo de uva sea considerado como una fuente potencial para la obtención de compuestos con interés biológico aplicables en distintas industrias a nivel nacional.

Palabras clave: orujo, Subproductos del Vino, *Vitis vinifera* L., Compuestos Bioactivos.

Abstract

Grape pomace is the main solid by-product generated during winemaking and generally considered as waste. However, the growing concern regarding the negative impact on the environment of poor management of agroindustrial waste has encouraged the search for the management or use of by-products. In this sense, several researches have demonstrated the potential of grape pomace as a source for obtaining diverse bioactive compounds (compounds with beneficial biological properties for humans), which could be used in the food, cosmetic and / or pharmaceutical industry for the human benefit. The present review aims to disseminate relevant information on this respect, so as grape pomace is considered as a potential source for obtaining compounds with biological interest suitable in different industries nationwide.

Keywords: pomace, Wine By-Products, *Vitis vinifera* L., Bioactive Compounds.

¹ Estudiante de Maestría en Biociencias, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, a222230153@unison.mx, ORCID: 0000-0003-2151-437X.

² Químico Biólogo Clínico, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, claudia.molina@unison.mx, ORCID: 0000-0001-6568-6574

³ Doctor en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, maribel.ovando@unison.mx, ORCID: 0000-0002-3282-9636

⁴ Estudiante de Doctorado en Ciencias de los Materiales, Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, leonb@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8938-4447.



INTRODUCCIÓN

El vino se ha convertido en una de las bebidas más populares en los últimos años y esto se debe principalmente a la estrecha relación entre su consumo (con moderación) y sus múltiples beneficios a la salud, mismos que son otorgados por el alto contenido de compuestos bioactivos [1]. De acuerdo con la OIV (International Organisation of Vine and Wine) en los últimos años la producción de vino a nivel mundial se ha mantenido en alrededor de 26 millones de hectolitros anuales [2]. Esta alta demanda de producción tiene un impacto negativo a nivel ambiental, ya que la producción del vino genera una gran cantidad de residuos que no son aprovechados adecuadamente convirtiéndose en contaminantes ambientales [3]–[5]. Durante todo el proceso de elaboración del vino se generan diversas y grandes cantidades de residuos (Figura 1). Dentro de estos residuos el orujo representa el mayor residuo sólido, representando hasta un 30% del peso total de las uvas producidas en los viñedos [6]. Se estima que por cada 6 litros de vino elaborado se obtiene 1 kilo de orujo de uva [7].

El orujo de uva es resultado del prensado de uvas en la elaboración de vino blanco o tras la etapa de fermentación en el caso del vino tinto [6] y consta principalmente de la piel o cáscara, pulpa residual, semillas y tallos [5], [8], [9]. Aunque sea considerado como un residuo o desperdicio, usualmente el aprovechamiento que se le da a esta materia es como abono para los cultivos (de uva) o como alimento para animales [3], [10]. La idea de darle un valor agregado a este subproducto tiene ya más de 40 años [9]. En este sentido, su valorización está fuertemente unido a su uso como fuente potencial para la obtención de compuestos bioactivos (Figura 2), los cuales brindan múltiples beneficios a la salud humana, y por lo tanto cuentan con un gran potencial en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. Además, se considera una estrategia para la reducción de la contaminación ambiental [4], [8], [11].

Por lo anterior, la presente revisión pretende dar a conocer información relevante que promueva la utilización del orujo de uva de la industria vinícola nacional como fuente de obtención de diversos compuestos bioactivos (biológicamente activos) para potenciales aplicaciones benéficas para el ser humano, así como de revalorizar esta materia para las industrias y contribuir al cuidado del medio ambiente.

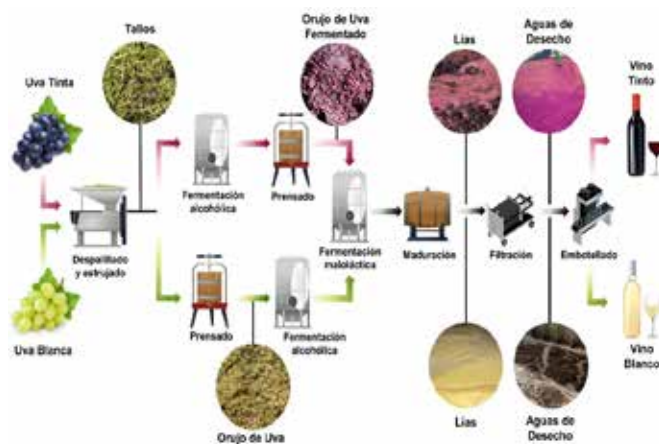


Figura 1. Proceso de elaboración del vino y principales subproductos generados en cada etapa.

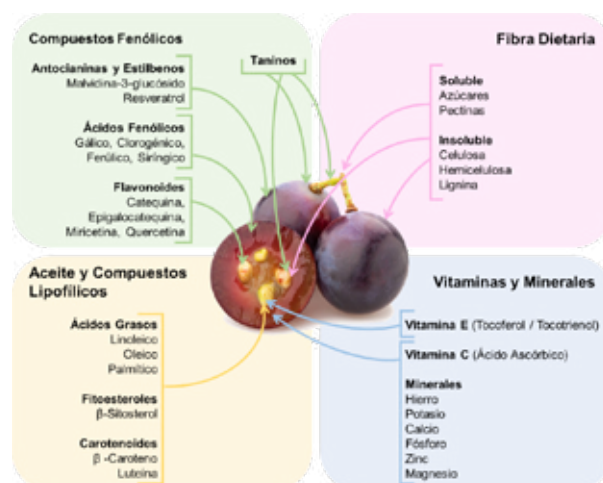


Figura 2. Distribución de los principales compuestos bioactivos en los componentes del orujo de uva (piel, semilla, pulpa y tallo).

Orujo como fuente de compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos son unos de los metabolitos secundarios más comunes en las plantas. Estos compuestos juegan un rol importante en la interacción de





la planta con el medio ambiente u otras plantas, proveen protección contra los rayos ultravioleta (UV), patógenos y depredadores. Asimismo, son los responsables del amargor, color y sabor de algunas frutas y verduras [12]. Aunque no son considerados nutrientes, su ingesta por medio del consumo de vegetales se relaciona altamente con beneficios a la salud, como efectos antialérgicos, antiinflamatorios, antimicrobianos, antitrombóticos, anticancerígenos, cardioprotectores y sobre todo antioxidantes [13]. Estructuralmente, los compuestos fenólicos contienen un anillo aromático, con uno o más sustituyentes de grupos hidroxilo, y van desde moléculas sencillas hasta moléculas más complejas, por lo cual suelen ser clasificados en flavonoides y no flavonoides, cada uno con subdivisiones [14] (Figura 3). Con respecto al orujo de uva como fuente de compuestos fenólicos, se estima que alrededor de un 70% del contenido de compuestos fenólicos presentes en la uva permanecen en el orujo después del proceso de elaboración del vino [6]. Compuestos como el resveratrol (4.58 µg/g), ácido protocatecuico (18.1 µg/g), epigallocatequina (146 µg/g), miricetina-3-O-ramnósido (50.9 µg/g) y antocianinas (cianidina-3-glucósido (14.9 µg/g), malvidina-3-glucósido (954 µg/g), petunidina-3-glucósido (263 µg/g)) son ampliamente reportados en orujo de uva tinta. En el caso del orujo de uva blanca se destaca el gran contenido de ácidos fenólicos como vanílico (11.5 µg/g), gentísico (29.4 µg/g), sirínico (14 µg/g), ferúlico (5.76 µg/g), entre otros; además de catequinas (68.7 µg/g) [15] y otros flavonoides como rutina (2.63 µg/g), quercetina (6.69 µg/g), luteolina (3.50 µg/g), etc. [10], [16]. Otros compuestos incluyen, ácidos caftárico, clorogénico y coutárico, y flavonoides como kaempferol, astilbina y engelitina [11]. Las antocianinas podrían considerarse como los compuestos más abundantes en el orujo de uva tinta, ya que son las responsables del color rojo, presentándose principalmente en la piel [6], [8], [9]. Los compuestos flavonoides se encuentran presentes en todos los componentes del orujo de uva, sin embargo más de la mitad de la concentración

total se encuentra en las semillas [6], [9]. De manera contraria la mayor concentración de ácidos fenólicos se puede encontrar en la piel y la pulpa remanente del orujo [17]. Finalmente, el orujo también presenta una gran cantidad de compuestos fenólicos complejos denominados como proantocianidinas o taninos, de los cuales se ha observado que la complejidad (o tamaño) de estos compuestos es menor en la semilla [9]. Los taninos se caracterizan por dejar una sensación de amargor y sequedad en la boca, denominada astringencia [13].

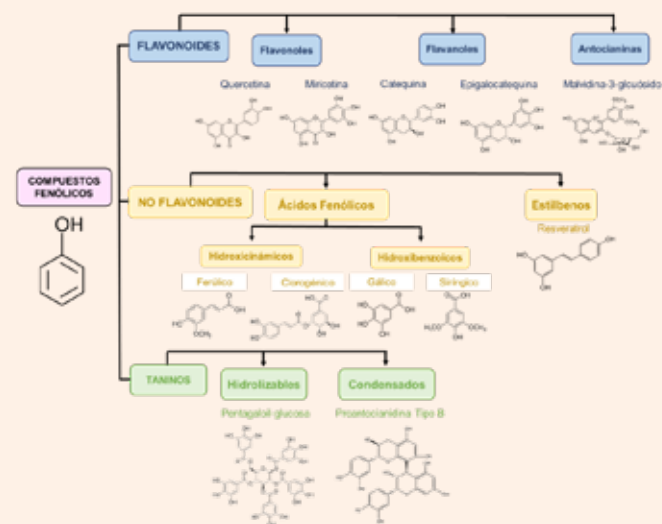


Figura 3. Clasificación y estructura de los principales compuestos fenólicos en el orujo de uva.

Es importante mencionar que la distribución de los compuestos fenólicos cambia entre las distintas variedades de uva y las condiciones de cultivo, algunas variedades presentarán mayor concentración de compuestos o presentarán compuestos específicos en comparación con otras variedades [18], [19]. Lo cual es importante considerar al momento de utilizar el orujo de uva como fuente de obtención de compuestos fenólicos.

Orujo como fuente de fibra dietaria

La fibra dietaria es aquella fracción de compuestos o moléculas complejas (Figura 4) (compuesta principalmente de carbohidratos) que no fueron digeridas o absorbidas durante el proceso digestivo, pasando al intestino grueso en donde actúa como fuente de alimento para la microbiota colónica (microorganismos presentes en el colon) [20]. Una vez metabolizada por la microbiota, la fibra dietaria se convierte en una gran cantidad de compuestos con alto potencial biológico, que se han relacionado con la prevención de enfermedades como la diabetes, obesidad, inmunodeficiencia, enfermedades inflamatorias, cáncer, etc. [21]. En este sentido el orujo de uva se considera una fuente de fibra dietaria y puede contener entre el 20 y 80%, conformada principalmente por pectina (37-54%), celulosa (27-37%), lignina (16.8-24.2%) y otros polisacáridos [7], [22]. En el orujo de uva, los polisacáridos de la pared celular como celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina representan

la fracción más larga [7], [23]. Se ha reportado a la pectina como el principal constituyente de la pared celular en orujo de uva, seguido de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Por otro lado, en el raquis un mayor contenido de celulosa, y después pectina como segundo polisacárido. De acuerdo con los autores, tanto orujo de uva como el raquis no fueron diferentes en contenido de hemicelulosa [23]. Respecto a la semilla presente en el orujo de uva, se menciona que está constituida por celulosa y pectina [24], además que la semilla tiene mayor contenido de fibra dietaria que la piel [7]. Por otro lado, se ha mencionado que la piel de uva representa una fuente importante de hemicelulosa que forma complejos con lignina [25].



(grado de aprovechamiento por la microbiota colónica), funcionalidad (relacionada con el mejoramiento de síntomas como estreñimiento, colon irritable, pérdida de peso, disminución de lípidos en sangre, otros) y solubilidad [7], [20], [24], [26], [27]. Si nos enfocamos en la solubilidad de la fibra en agua, se clasifica en fibra dietaria soluble (pectina, inulina, gomas, mucilago) y fibra dietaria insoluble (celulosa, hemicelulosa, lignina, quitina, otros). La suma de ambas representa la fibra dietaria total [20].

Orujo como fuente de aceite y otros compuestos lipofílicos

Los aceites comestibles provenientes de las plantas suponen una de las principales fuentes energéticas en la dieta humana, de igual forma son aprovechados en otras industrias como la cosmética y farmacéutica. Estos aceites están compuestos principalmente por ácidos grasos, vitaminas liposolubles (A, D, E, K), compuestos antioxidantes y minerales [28]. En este sentido el orujo de uva (principalmente la semilla) es una excelente fuente para la obtención de aceite, que se ha relacionado con múltiples

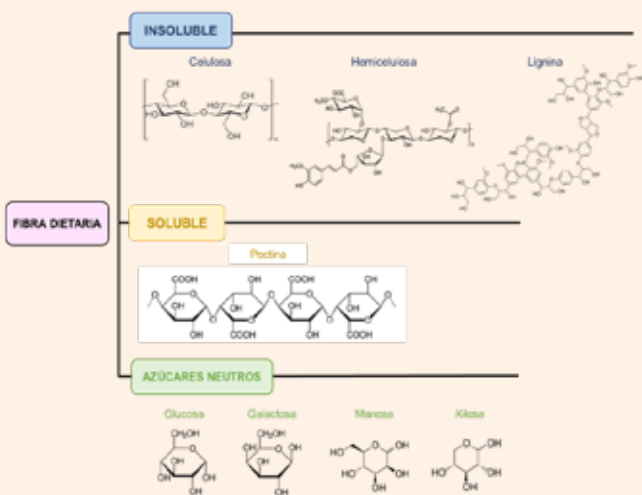


Figura 4. Clasificación y estructuras de la fibra dietaria en el orujo de uva.

Si a la fibra dietaria del orujo de uva se le realizará hidrólisis con diversas enzimas, se obtendrían azúcares como arabinosa, galactosa, ramnosa, glucosa, manosa, xilosa y ácido galacturónico [25]. El conocimiento del tipo de carbohidratos presentes en la fibra es importante para clasificarla de acuerdo con su grado de fermentación



beneficios a la salud como propiedades antiinflamatorias, cardioprotectivas, antimicrobianas y anticancerígenas [29]. La semilla de uva puede contener hasta 20% de aceite y se compone principalmente por ácidos grasos, vitamina E, fitoesteroles, carotenoides y compuestos fenólicos [29], [30]. Los ácidos grasos son moléculas orgánicas, que constan de una cadena lineal hidrocarbonada con una terminación ácida. Estos se clasifican saturados (no contienen dobles enlaces) monoinsaturados (un doble enlace) y poliinsaturados (dos o más dobles enlaces) [31] (Figura 5).

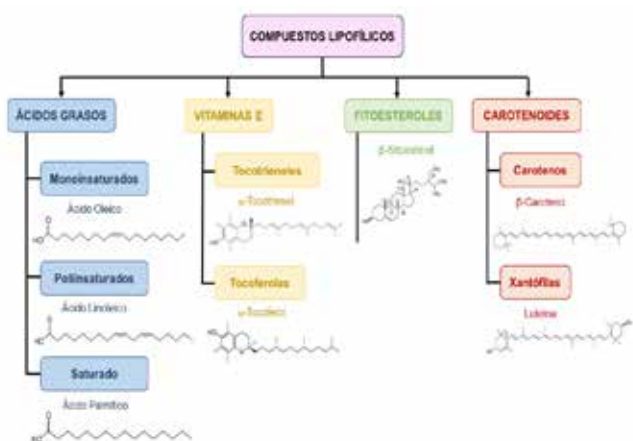


Figura 5. Clasificación y estructura de los principales compuestos lipofílicos en el orujo de uva.

El principal ácido graso presente en el aceite de orujo o semilla de uva es el ácido linoleico (60-80%), seguido del ácido oleico (15-20%) y ácido palmítico (5-10%); el resto de los ácidos grasos se relacionan con la variedad de la uva [9], [29], [30], [32]. La vitamina E es un potente antioxidante y es prácticamente el conjunto de dos grupos compuestos: tocoferoles (α , β , γ , Δ) y tocotrienoles (α , β , γ , Δ); estos se caracterizan por presentar un anillo cromanol y una cola lineal isoprenoide saturada e insaturada, respectivamente. Sin embargo, es el α -tocoferol el que se considera propiamente como vitamina E [33]. En este sentido, el α -tocoferol es el principal tocoferol presente en el aceite de semilla de uva (hasta 244 mg/kg) [8], [30]. En un consenso general, el contenido de tocotrienoles es mayor al contenido de tocoferoles alcanzando valores de 1575 mg/kg de aceite. Al igual que los compuestos fenólicos, los distintos componentes de la vitamina E, está influenciado por la variedad, tipo de cultivo y procesamiento de la uva [30], [34].

Otros componentes con gran presencia en el aceite de semilla de uva son los fitoesteroles; de los cuales el β -sitosterol es el más abundante (62-77%) [8], [30]. Los fitoesteroles están compuestos por una estructura tetracíclica con una cadena lateral, misma que tiene una estructura muy similar al colesterol (Figura 5), quizás el principal interés en estos compuestos es su uso para disminuir los niveles de colesterol en el ser humano [35]. En menor medida, se ha reportado la presencia de carotenoides en el aceite de semilla de orujo de

uva, como β -caroteno (0.15 μ g/g) y luteína (0.21 μ g/g) ([36]–[38]). Los carotenoides son de gran interés por sus propiedades antioxidantes, protectoras en padecimientos cardiovasculares, antidiabéticas, anticancerígenas, etc. Estos compuestos son los responsables de la coloración roja, amarilla y naranja de los vegetales, y estructuralmente constan de cadenas isoprenoides que pueden presentar anillos al final de la cadena [39] (Figura 5).

Orujo como fuente de vitaminas y minerales

Otro grupo importante de compuestos con un alto valor nutricional en los alimentos son las vitaminas y minerales. Ambos son conocidos como micronutrientes, y tienen beneficios a la salud como mantenimiento de tejidos, huesos, formación de dientes, regulación y coordinación de funciones en el cuerpo; así como funciones bioquímicas y fisiológicas. Además, de relacionarse con efectos anticancerígenos, antidiabéticos y contra enfermedades cardiovasculares [40], [41]. En el grupo de las vitaminas se encuentran las vitaminas solubles B y C, y las vitaminas insolubles A, D, E y K [40].

Como se mencionó anteriormente el orujo uva (aceite) es una fuente de vitamina E y A. Sin embargo, el orujo de uva también es una fuente importante de vitamina C (ácido ascórbico). Se han reportado concentraciones de entre 20-30 mg/100 g de orujo [42], [43]. Quizás las vitaminas E, A y C sean las vitaminas con más relevancia en el orujo de uva, sin embargo, la literatura también reporta la presencia de vitamina K, D y vitaminas del complejo B [34], [44].

Con respecto a los minerales, son elementos inorgánicos requeridos por el cuerpo humano como electrolitos y en procesos bioquímicos. Estos minerales se clasifican en macrominerales (altas concentraciones) (hierro, calcio, sodio, magnesio, fósforo y potasio), y en microminerales (bajas concentraciones) (zinc, manganeso, molibdeno, yodo, selenio, azufre, cloro, cobalto y cobre) [40]. En el caso del orujo se ha reportado la presencia en altas cantidades de hierro (21.54-54.68 mg/g), fósforo (15.61-31.57 mg/g), potasio (11.84-27.18 mg/g), zinc (12.64-22.51 mg/g), manganeso (7.56-13.56 mg/g), calcio (2.56-9.61 mg/g), magnesio (1.68-6.44 mg/g) y cobre (1.14-2.58 mg/g). El contenido de minerales varía según la variedad de uva [32], [34], [42].

Aplicaciones potenciales

El orujo de uva se ha establecido como una fuente potencial de compuestos bioactivos, con múltiples actividades biológicas benéficas para el ser humano, y por lo tanto con gran potencial en diversas industrias [8]. En la industria alimentaria, el orujo de uva y sus componentes son propuestos o utilizados para el desarrollo de alimentos fortificados [4], [45], [46]. Un alimento fortificado es un alimento al cual se le ha agregado un componente que mejora o brinda nuevas propiedades benéficas para el consumidor [47]. Debido a alto contenido de fibra dietaria y compuestos fenólicos, el orujo es usualmente utilizado en el desarrollo de pastas (espagueti, fettuccini, fideos) y productos de panadería fortificados (pan, galletas, muffins),



con aceptación considerable por consumidores [45], [48]. Los productos lácteos como la leche, el yogurt y los quesos también se han fortificado con orujo de uva, destacando los cambios en las propiedades organolépticas (color, sabor, textura), el incremento del valor nutricional, mejora en la inocuidad (debido a la eliminación de bacterias patógenas) y propiedades que favorecen la presencia de bacterias probióticas [45], [49]. En el caso de alimentos de procedentes de la industria cárnica terrestre y acuática, el orujo se ha utilizado para modificar las propiedades sensoriales (olor, color, textura, sabor) de algunos productos [50]. No obstante, su uso tiene mayor enfoque en la preservación de calidad e inocuidad de los productos, gracias a las propiedades antioxidantes y antimicrobianas de los compuestos presentes en el orujo [51]. Asimismo, se ha incrementado el interés de fortificar tanto bebidas alcohólicas (vino) como no alcohólicas, debido a la gran cantidad de compuestos antioxidantes y pigmentos en el orujo de uva [4].

En los últimos años la industria cosmética se ha enfocado en la utilización de compuestos naturales y es aquí donde los compuestos bioactivos (del orujo de uva tienen un gran potencial). Esto se debe a las propiedades de bloqueo de la luz ultravioleta, antioxidantes, antienvjecimiento, despigmentantes (aclaramientos), antiinflamatorias, cicatrizantes y antimicrobianas [52], [53]. Los estudios se enfocan principalmente en la adición de extractos a diversas clases de productos cosméticos como cremas, lociones, bloqueadores, sérums, pastas dentales etc., y la evaluación de sus efectos [54]. Incluso ya existen algunos de estos productos que confirman el uso de componentes presentes en el orujo de uva [8].

En la industria farmacéutica el orujo de uva tiene gran potencial para la elaboración de nuevos fármacos o suplementos con diversas propiedades biológicas [8], [11]. Además del potencial para desarrollo fármacos antioxidantes, podrían generarse fármacos que sean de apoyo en la reducción de los niveles de colesterol [55], antibacterianos [56], [57], antivirales [57], anticancerígenos [56], antiplaquetarios [19], cardioprotectores [58], antiinflamatorios [59], por mencionar algunos.

CONCLUSIÓN

El orujo de uva es fuente de compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, fibra dietaria, ácidos grasos, tocoferoles, fitoesteroles, carotenoides, vitaminas y minerales que pueden ser aprovechados en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. Por tal motivo, es de vital importancia continuar con investigaciones sobre la composición y obtención de los compuestos bioactivos del orujo de uva y generar estrategias adecuadas y sustentables que permitan su aprovechamiento al máximo sin tener un impacto negativo al medio ambiente, generando así un sistema de economía circular en industria vitivinícola.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Snopek et al., "Contribution of Red Wine Consumption to Human Health Protection," *Mol.* 2018, Vol. 23, Page 1684, vol. 23, no. 7, p. 1684, Jul. 2018, doi: 10.3390/MOLECULES23071684.
- [2] "World Statistics | OIV," 2022. https://www.oiv.int/what-we-do/global-report?oivogle.com/search?q=%5B2%5D+https%3A%2F%2Fwww.oiv.int%2Fwhat-we-do%2Fglobal-report%3Foiv&rlz=1C1VDKB_esMX1011MX1011&oq=%5B2%5D%09https%3A%2F%2Fwww.oiv.int%2Fwhat-we-do%2Fglobal-report%3Foiv&aqs=chrome.0.69i59. (accessed Dec. 02, 2022).
- [3] M. Gómez-Brandón, M. Lores, H. Insam, and J. Domínguez, "Strategies for recycling and valorization of grape marc," <https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1555514>, vol. 39, no. 4, pp. 437–450, May 2019, doi: 10.1080/07388551.2018.1555514.
- [4] R. Ferrer-Gallego and P. Silva, "The Wine Industry By-Products: Applications for Food Industry and Health Benefits," *Antioxidants* 2022, Vol. 11, Page 2025, vol. 11, no. 10, p. 2025, Oct. 2022, doi: 10.3390/ANTIOX11102025.
- [5] S. Maicas and J. J. Mateo, "Sustainability of Wine Production," *Sustain.* 2020, Vol. 12, Page 559, vol. 12, no. 2, p. 559, Jan. 2020, doi: 10.3390/SU12020559.
- [6] K. I. B. Moro, A. B. B. Bender, L. P. da Silva, and N. G. Penna, "Green Extraction Methods and Microencapsulation Technologies of Phenolic Compounds From Grape Pomace: A Review," *Food Bioprocess Technol.* 2021 148, vol. 14, no. 8, pp. 1407–1431, May 2021, doi: 10.1007/S11947-021-02665-4.
- [7] M. Spinei and M. Oroian, "The Potential of Grape Pomace Varieties as a Dietary Source of Pectic Substances," *Foods* 2021, Vol. 10, Page 867, vol. 10, no. 4, p. 867, Apr. 2021, doi: 10.3390/FOODS10040867.
- [8] C. Beres et al., "Towards integral utilization of grape pomace from winemaking process: A review," *Waste Manag.*, vol. 68, pp. 581–594, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.WASMAN.2017.07.017.
- [9] M. Bordiga, F. Travaglia, and M. Locatelli, "Valorisation of grape pomace: an approach that is increasingly reaching its maturity – a review," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 933–942, Apr. 2019, doi: 10.1111/IJFS.14118.
- [10] I. C. Bocsan et al., "Antioxidant and Anti-Inflammatory Actions of Polyphenols from Red and White Grape Pomace in Ischemic Heart Diseases," *Biomed.* 2022, Vol. 10, Page 2337, vol. 10, no. 10, p. 2337, Sep. 2022, doi: 10.3390/BIOMEDICINES10102337.
- [11] J. N. Averilla, J. Oh, H. J. Kim, J. S. Kim, and J. S. Kim, "Potential health benefits of phenolic compounds in grape processing by-products," *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 28, no. 6, pp. 1607–1615, Dec. 2019, doi: 10.1007/S10068-019-00628-2/FIGURES/2.
- [12] O. R. Alara, N. H. Abdurahman, and C. I. Ukaegbu, "Extraction

- of phenolic compounds: A review," *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 4, pp. 200–214, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CRFS.2021.03.011.
- [13] B. R. Albuquerque, S. A. 8. Heleno, M. B. P. P. Oliveira, L. Barros, and I. C. F. R. Ferreira, "Phenolic compounds: current industrial applications, limitations and future challenges," *Food Funct.*, vol. 12, no. 1, pp. 14–29, Jan. 2021, doi: 10.1039/D0FO02324H.
- [14] A. Durazzo et al., "Polyphenols: A concise overview on the chemistry, occurrence, and human health," *Phyther. Res.*, vol. 33, no. 9, pp. 2221–2243, Sep. 2019, doi: 10.1002/PTR.6419.
- [15] G. Gerardi, M. Cavia-Saiz, M. D. Rivero-Pérez, M. L. González-Sanjóse, and P. Muñoz, "The dose response effect on polyphenol bioavailability after intake of white and red wine pomace products by Wistar rats," *Food Funct.*, vol. 11, no. 2, pp. 1661–1671, Feb. 2020, doi: 10.1039/C9FO01743G.
- [16] M. L. Moldovan et al., "A Design of Experiments Strategy to Enhance the Recovery of Polyphenolic Compounds from Vitis vinifera By-Products through Heat Reflux Extraction," *Biomol.* 2019, Vol. 9, Page 529, vol. 9, no. 10, p. 529, Sep. 2019, doi: 10.3390/BIOM9100529.
- [17] F. Cosme, T. Pinto, and A. Vilela, "Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Grape Juices: A Chemical and Sensory View," *Beverages* 2018, Vol. 4, Page 22, vol. 4, no. 1, p. 22, Mar. 2018, doi: 10.3390/BEVERAGES4010022.
- [18] A. Fontana et al., "Phenolics profiling of pomace extracts from different grape varieties cultivated in Argentina," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 47, pp. 29446–29457, Jun. 2017, doi: 10.1039/C7RA04681B.
- [19] A. Muñoz-Bernal et al., "Phytochemical Characterization and Antiplatelet Activity of Mexican Red Wines and Their By-products," *South African J. Enol. Vitic.*, vol. 42, no. 1, pp. 77–90, 2021, doi: 10.21548/42-1-4450.
- [20] E. S. V. Rezende, G. C. Lima, and M. M. V. Naves, "Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposal classification by prebiotic categories," *Nutrition*, vol. 89, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.NUT.2021.111217.
- [21] J. Cui et al., "Dietary Fibers from Fruits and Vegetables and Their Health Benefits via Modulation of Gut Microbiota," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 18, no. 5, pp. 1514–1532, Sep. 2019, doi: 10.1111/1541-4337.12489.
- [22] A. K. Chakka and A. S. Babu, "Bioactive Compounds of Winery by-products: Extraction Techniques and their Potential Health Benefits," *Appl. Food Res.*, vol. 2, no. 1, p. 100058, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.AFRES.2022.100058.
- [23] M. R. González-Centeno, C. Rosselló, S. Simal, M. C. Garau, F. López, and A. Femenia, "Physico-chemical properties of cell wall materials obtained from ten grape varieties and their byproducts: grape pomaces and stems," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 43, no. 10, pp. 1580–1586, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.LWT.2010.06.024.
- [24] P. Chowdhary, A. Gupta, E. Gnansounou, A. Pandey, and P. Chaturvedi, "Current trends and possibilities for exploitation of Grape pomace as a potential source for value addition," *Environ. Pollut.*, vol. 278, p. 116796, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2021.116796.
- [25] T. Ilyas, P. Chowdhary, D. Chaurasia, E. Gnansounou, A. Pandey, and P. Chaturvedi, "Sustainable green processing of grape pomace for the production of value-added products: An overview," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 23, p. 101592, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ETI.2021.101592.
- [26] B. V. McCleary et al., "Total Dietary Fiber (CODEX Definition) in Foods and Food Ingredients by a Rapid Enzymatic-Gravimetric Method and Liquid Chromatography: Collaborative Study, First Action 2017.16," *J. AOAC Int.*, vol. 102, no. 1, pp. 196–207, Jan. 2019, doi: 10.5740/JAOACINT.18-0180.
- [27] M. Troilo, G. Difonzo, V. M. Paradiso, C. Summo, and F. Caponio, "Bioactive Compounds from Vine Shoots, Grape Stalks, and Wine Lees: Their Potential Use in Agro-Food Chains," *Foods* 2021, Vol. 10, Page 342, vol. 10, no. 2, p. 342, Feb. 2021, doi: 10.3390/FOODS10020342.
- [28] Y. Zhou, W. Zhao, Y. Lai, B. Zhang, and D. Zhang, "Edible Plant Oil: Global Status, Health Issues, and Perspectives," *Front. Plant Sci.*, vol. 11, p. 1315, Aug. 2020, doi: 10.3389/FPLS.2020.01315/BIBTEX.
- [29] J. Garavaglia, M. M. Markoski, A. Oliveira, and A. Marcadenti, "The Potential of Grape Pomace Varieties as a Dietary Source of Pectic Substances," *Foods* 2021, Vol. 10, Page 867, vol. 10, no. 4, p. 867, Apr. 2021, doi: 10.3390/FOODS10040867.
- [30] M. E. Martin, E. Grao-Cruces, M. C. Millan-Linares, and S. Montserrat-De la Paz, "Grape (Vitis vinifera L.) Seed Oil: A Functional Food from the Winemaking Industry," *Foods* 2020, Vol. 9, Page 1360, vol. 9, no. 10, p. 1360, Sep. 2020, doi: 10.3390/FOODS9101360.
- [31] J. Chen and H. Liu, "Nutritional Indices for Assessing Fatty Acids: A Mini-Review," *Int. J. Mol. Sci.* 2020, Vol. 21, Page 5695, vol. 21, no. 16, p. 5695, Aug. 2020, doi: 10.3390/IJMS21165695.
- [32] I. A. Mohamed Ahmed et al., "Chemical composition, bioactive compounds, mineral contents, and fatty acid composition of pomace powder of different grape varieties," *J. Food Process. Preserv.*, vol. 44, no. 7, p. e14539, Jul. 2020, doi: 10.1111/JFPP.14539.
- [33] G. Y. Lee and S. N. Han, "The Role of Vitamin E in Immunity," *Nutr.* 2018, Vol. 10, Page 1614, vol. 10, no. 11, p. 1614, Nov. 2018, doi: 10.3390/NU10111614.





- [34]C. Yang et al., "Processing technologies, phytochemical constituents, and biological activities of grape seed oil (GSO): A review," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 116, pp. 1074–1083, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.TIFS.2021.09.011.
- [35]R. A. Moreau et al., "Phytosterols and their derivatives: Structural diversity, distribution, metabolism, analysis, and health-promoting uses," *Prog. Lipid Res.*, vol. 70, pp. 35–61, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.PLIPRES.2018.04.001.
- [36]H. Lutterodt, M. Slavin, M. Whent, E. Turner, and L. Yu, "Fatty acid composition, oxidative stability, antioxidant and antiproliferative properties of selected cold-pressed grape seed oils and flours," *Food Chem.*, vol. 128, no. 2, pp. 391–399, Sep. 2011, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2011.03.040.
- [37]M. Durante et al., "Seeds of pomegranate, tomato and grapes: An underestimated source of natural bioactive molecules and antioxidants from agri-food by-products," *J. Food Compos. Anal.*, vol. 63, pp. 65–72, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JFCA.2017.07.026.
- [38]F. B. Shinagawa, F. C. de Santana, E. Araujo, E. Purgatto, and J. Mancini-Filho, "Chemical composition of cold pressed Brazilian grape seed oil," *Food Sci. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 164–171, Oct. 2017, doi: 10.1590/1678-457X.08317.
- [39]L. I. Elvira-Torales, J. García-Alonso, and M. J. Periago-Castón, "Nutritional Importance of Carotenoids and Their Effect on Liver Health: A Review," *Antioxidants* 2019, Vol. 8, Page 229, vol. 8, no. 7, p. 229, Jul. 2019, doi: 10.3390/ANTIOX8070229.
- [40]A. G. Godswill, I. V. Somtochukwu, A. O. Ikechukwu, and E. C. Kate, "Health Benefits of Micronutrients (Vitamins and Minerals) and their Associated Deficiency Diseases: A Systematic Review," *Int. J. Food Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–32, Jan. 2020, doi: 10.47604/IJF.1024.
- [41]F. F. Zhang, S. I. Barr, H. McNulty, D. Li, and J. B. Blumberg, "Health effects of vitamin and mineral supplements," *BMJ*, vol. 369, Jun. 2020, doi: 10.1136/BMJ.M2511.
- [42]E. C. Sousa et al., "Chemical composition and bioactive compounds of grape pomace (*Vitis vinifera* L.), Benitaka variety, grown in the semiarid region of Northeast Brazil," *Food Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 135–142, 2014, doi: 10.1590/S0101-20612014000100020.
- [43]A. Nayak, B. Bhushan, A. Rosales, L. R. Turienzo, and J. L. Cortina, "Valorisation potential of Cabernet grape pomace for the recovery of polyphenols: Process intensification, optimisation and study of kinetics," *Food Bioprod. Process.*, vol. 109, pp. 74–85, May 2018, doi: 10.1016/J.FBP.2018.03.004.
- [44]A. Tikhonova, N. Ageeva, and E. Globa, "Grape pomace as a promising source of biologically valuable components," *BIO Web Conf.*, vol. 34, p. 06002, 2021, doi: 10.1051/BIOCONF/20213406002.
- [45]B. Antonić, S. Jančiková, D. Dordević, and B. Tremlová, "Grape Pomace Valorization: A Systematic Review and Meta-Analysis," *Foods* 2020, Vol. 9, Page 1627, vol. 9, no. 11, p. 1627, Nov. 2020, doi: 10.3390/FOODS9111627.
- [46]K. Sridhar and A. L. Charles, "Fortification using grape extract polyphenols – a review on functional food regulations," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 56, no. 8, pp. 3742–3751, Aug. 2021, doi: 10.1111/IJFS.15001.

- [47]M. Cruzado and J. C. Cedrón, "Nutracéuticos, alimentos funcionales y su producción," *Rev. Química*, vol. 26, no. 1–2, pp. 33–36, Aug. 2012, Accessed: Dec. 05, 2022. [Online]. Available: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/7307>
- [48]J. M. Boff, V. J. Strasburg, G. T. Ferrari, H. de O. Schmidt, V. Manfro, and V. R. de Oliveira, "Chemical, Technological, and Sensory Quality of Pasta and Bakery Products Made with the Addition of Grape Pomace Flour," *Foods* 2022, Vol. 11, Page 3812, vol. 11, no. 23, p. 3812, Nov. 2022, doi: 10.3390/FOODS11233812.
- [49]P. Kandyli, D. Dimitrellou, and T. Moschakis, "Recent applications of grapes and their derivatives in dairy products," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 114, pp. 696–711, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.TIFS.2021.05.029.
- [50]F. Mainente, A. Menin, A. Alberton, G. Zoccatelli, and C. Rizzi, "Evaluation of the sensory and physical properties of meat and fish derivatives containing grape pomace powders," *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 952–958, Apr. 2019, doi: 10.1111/IJFS.13850.
- [51]M. E. dos S. Silva, C. V. B. Grisi, S. P. da Silva, M. S. Madruga, and F. A. P. da Silva, "The technological potential of agro-industrial residue from grape pulping (*Vitis* spp.) for application in meat products: A review," *Food Biosci.*, vol. 49, p. 101877, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.FBIO.2022.101877.
- [52]M. L. Soto, E. Falqué, and H. Domínguez, "Relevance of Natural Phenolics from Grape and Derivative Products in the Formulation of Cosmetics," *Cosmet.* 2015, Vol. 2, Pages 259–276, vol. 2, no. 3, pp. 259–276, Aug. 2015, doi: 10.3390/COSMETICS2030259.
- [53]M. A. Nunes, F. Rodrigues, and M. B. P. P. Oliveira, "Grape Processing By-Products as Active Ingredients for Cosmetic Proposes," *Handb. Grape Process. By-Products Sustain. Solut.*, pp. 267–292, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-809870-7.00011-9.
- [54]I. Hoss et al., "Valorization of Wine-Making By-Products' Extracts in Cosmetics," *Cosmet.* 2021, Vol. 8, Page 109, vol. 8, no. 4, p. 109, Nov. 2021, doi: 10.3390/COSMETICS8040109.
- [55]M. Ferri et al., "Recovery of polyphenols from red grape pomace and assessment of their antioxidant and anti-cholesterol activities," *N. Biotechnol.*, vol. 33, no. 3, pp. 338–344, May 2016, doi: 10.1016/J.NBT.2015.12.004.
- [56]C. M. Peixoto et al., "Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties," *Food Chem.*, vol. 253, pp. 132–138, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2018.01.163.
- [57]A. A. Gaafar, M. S. Asker, A. M. A., and Z. A. Salama, "The effectiveness of the functional components of grape (*Vitis vinifera*) pomace as antioxidant, antimicrobial, and antiviral agents," *Jordan J. Biol. Sci.*, vol. 12, no. 5, pp. 625–635, 2019.
- [58]R. M. Pop, A. Popolo, A. P. Trifa, and L. A. Stanciu, "Phytochemicals in Cardiovascular and Respiratory Diseases: Evidence in Oxidative Stress and Inflammation," *Oxid. Med. Cell. Longev.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1603872.
- [59]C. Denny et al., "Bioprospection of Petit Verdot grape pomace as a source of anti-inflammatory compounds," *J. Funct. Foods*, vol. 8, no. 1, pp. 292–300, May 2014, doi: 10.1016/J.JFF.2014.03.016.

Cómo citar este artículo:

López-Astorga, M., Molina Domínguez, C. C., Ovando Martínez, M., & Leon-Bejarano, M. (2022). Orujo de Uva: Más que un Residuo, una Fuente de Compuestos Bioactivos. *EPISTEMUS*, 16(33).
<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.283>

La Universidad de Sonora, a través de las Divisiones de Ingeniería, de Ciencias Exactas y Naturales, así como de Ciencias Biológicas y de la Salud emite la presente invitación para participar en la

Convocatoria para recepción de manuscritos

No. 34

La revista *Epistemus* (ISSN: 2007-8196) publica artículos originales e inéditos de proyectos de investigación, reseñas, ensayos y comunicaciones breves sobre ciencia y tecnología y salud, dirigida a investigadores, profesores, estudiantes y profesionales en diversas áreas.

Áreas de conocimiento:

(no limitadas a los siguientes campos)

- » Ingenierías: materiales, metalurgia, civil, minas, industrial, ambiental, hidráulica, sistemas de información, mecatrónica, alimentos, energía, agua, entre otras.
- » Ciencias exactas y naturales: geología, física, matemáticas, electrónica y ciencias de la computación.
- » Ciencias biológicas y de la salud: investigación en alimentos, desarrollo regional, acuacultura, salud, biología, agricultura, entre otras.

Fechas Importantes:

- » Límite de envío de manuscritos para el No. 34 Marzo 15, 2023.
- » Publicación electrónica Continúa..

RECIBIMOS ARTÍCULOS DURANTE TODO EL AÑO

Envío de manuscritos: www.epistemus.uson.mx

Mayores informes: epistemus@unison.mx



SÍGUENOS

RevistaEpistemusCTyS

Rosales y Blvd. Luis encinas Johnson, Hermosillo, Sonora, 83000, México

