

Ingenierías



ENERO - JUNIO 2024, Volumen 27, No. 96

Ingenierías REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

- 3 Materiales de construcción fotocatalíticos para reducir la contaminación del aire**
Magaly Yajaira Nava Núñez, Azael Martínez De la Cruz
- 11 Sustentabilidad de materiales para el envasado de refrescos implementando un Análisis de Ciclo de Vida mediante SolidWorks Sustainability**
Roberto Carlos Cabriales Gómez, Yessica Marlen Arroyo Mayorga, Diana Cobos Zaleta, Luis Arturo Reyes Osorio
- 27 Aplicación del cálculo fraccionario en el modelado de corrientes transitorias en polímeros**
Jesús Gabino Puente-Córdova, Karla Louisse Segura-Méndez, Flor Yanhira Rentería-Baltíérrez, Isaac Yair Miranda-Valdez
- 39 Estudio comparativo de módulos de rigidez de tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas**
Javier Ramón Sotomayor Castellanos
- 49 Colaboradores**
- 51 Información para colaboradores**
- 52 Código de ética**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



Ingenierías

Ingenierías, Año XXVII N° 96, enero-junio 2024. Es una publicación trimestral, editada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Domicilio de la Publicación: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450. Teléfono: +52 (81) 83294020 Ext. 5854, Fax +52 81 83320904. Editor responsable: Dr. Juan Antonio Aguilar Garib. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2011-101411064600-102, ISSN: 1405-0676. Número de certificado de licitud de título y contenido: 15,525, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Registro de marca ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial: En trámite. Impresa por: Desarrollo Litográfico S.A. de C.V., M. del Llano 924 Ote., Centro, Monterrey, Nuevo León, México, C.P. 64000. Fecha de terminación de impresión: 15 de enero de 2024. Tiraje: 800 ejemplares. Distribuido por: Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455.

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

Prohibida su reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Editor.

Impreso en México
Todos los derechos reservados
© Copyright 2024
revistaingenierias@uanl.mx

DIRECTORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Dr. Santos Guzmán López
Rector
Dr. Juan Paura García
Secretario General
Dr. Jaime Arturo Castillo Elizondo
Secretario Académico
Dr. José Javier Villarreal Tostado
Secretario de Extensión y Cultura
Lic. Antonio Ramos Revillas
Director de Editorial Universitaria

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Dr. Arnulfo Treviño Cubero
Director
Dr. Fernando Banda Muñoz
Subdirector Académico
Dr. Juan Antonio Aguilar Garib
Editor responsable
M.C. Cyntia Ocañas Galván
Dr. Jesús G. Puente Córdova
Redacción
Gregoria Torres Garay
Tipografía y formación
Priscila Ivonne González Gallegos, Ximena Quetzelli Gutierrez Chaires,
Gabriel Martínez Villarreal
Auxiliares
Isaac Antonio Romero Nuñez, Karla Paola Martínez Segura
Diseño portada (Armonía Natural)
Ing. Cosme D. Cavazos Martínez
Webmaster
René de la Fuente Franco
Impresor

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Dr. Mauricio Cabrera Ríos, Puerto Rico. UPRM / Dra. Ruth Kiminami, Brasil. UFSC, San Pablo / Dr. Juan Jorge Martínez Vega, Francia. Universidad de Toulouse III / Dr. Zarel Valdez Nava, Francia. UPS-INPT-LAPLACE-CNRS.

CONSEJO EDITORIAL MÉXICO

Dr. Benjamín Limón Rodríguez, FIC-UANL / Dr. José Rubén Morones Ibarra, FCFM-UANL / Dr. Ubaldo Ortiz Méndez, FIME-UANL / Dr. Félix Sánchez De Jesús, ICBI-UAEH / Dr. Ernesto Vázquez Martínez, FIME-UANL.

COMITÉ TÉCNICO

Dr. Efraín Alcorta García, FIME-UANL / Dr. Rafael Colás Ortiz, FIME-UANL / Dr. Jesús De León Morales, FIME-UANL / Dr. Virgilio Ángel González González, FIME-UANL / Dr. Carlos Alberto Guerrero Salazar, FIME-UANL / Dra. Oxana Vasilievna Karissova, FCFM-UANL / Dr. Francisco Eugenio López Guerrero, FIME-UANL / Dr. Roger Z. Ríos Mercado, FIME-UANL / Dr. Juan Ángel Rodríguez Liñán, FIME-UANL.

Materiales de construcción fotocatalíticos para reducir la contaminación del aire

Magaly Yajaira Nava Núñez, Azael Martínez de la Cruz

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
magaly.navanu@uanl.edu.mx, azael.martinezdl@uanl.edu.mx

RESUMEN

En los últimos años, el problema de la contaminación del aire en las grandes ciudades ha llamado mucho la atención. Por ello se buscan soluciones innovadoras para contrarrestar la gran cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera a diario por la industria y los automóviles. La incorporación de fotocatalizadores en materiales de construcción ha surgido como alternativa de remediación ambiental, confiriéndole a los materiales convencionales propiedades de purificación de aire y autolimpieza. El propósito de este trabajo es presentar aspectos relevantes del desarrollo de materiales de construcción fotocatalíticos: sus principales aplicaciones, tendencias y perspectivas a mediano y largo plazo.

PALABRAS CLAVE

Fotocatálisis, construcción, semiconductores, autolimpieza, NO_x.

ABSTRACT

In recent years, the problem of air pollution in large cities has attracted a lot of attention. For this reason, innovative solutions are sought to counteract the large amount of pollutants emitted into the atmosphere on a daily basis by industry and automobiles. The incorporation of photocatalysts in construction materials has emerged as an environmental remediation alternative, giving conventional materials air purification and self-cleaning properties. This paper aims to present relevant aspects of the development of photocatalytic construction materials: their main applications, trends, and perspectives in the medium and long term.

KEYWORDS

Photocatalysis, construction, semiconductors, self-cleaning, NO_x.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire ha cobrado reconocimiento y prominencia en las agendas de cumbres mundiales de naciones sobre la protección de la salud y el medioambiente, siendo considerada una de las principales problemáticas a las que se enfrentan las ciudades más pobladas del mundo.¹ Teniendo en cuenta que alrededor del 55 % de la población mundial se concentra en las grandes urbes, un alto porcentaje de las personas respira un aire de mala calidad.² Aunque siempre ha existido la contaminación atmosférica de origen natural, fue a partir del descubrimiento del fuego cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica, la cual ha cobrado importancia sobre todo a partir de la Revolución Industrial con el uso masivo de combustibles fósiles como principal fuente de energía. La contaminación del aire tiene una serie de efectos perjudiciales para la salud humana y el medioambiente. Estudios recientes han demostrado que inhalar aire contaminado incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias como neumonía y asma, además de que aumenta el riesgo de contraer formas graves de COVID-19, cáncer y enfermedades cardíacas.³

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido seis contaminantes criterio para definir la calidad del aire exterior: ozono troposférico (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM) y plomo (Pb).^{4,5} Entre estos

contaminantes atmosféricos, los NO_x representados por el NO_2 constituyen uno de los agentes más nocivos para los seres humanos y el medioambiente. La formación de NO_x en el aire se debe a la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas, principalmente llevados a cabo en automóviles con motores de combustión interna. Las principales fuentes de generación de NO_x provienen de las emisiones producidas por las industrias y el parque vehicular. Los NO_x pueden permanecer en la atmósfera durante varios días y en ese período reaccionar con otros compuestos, produciendo la lluvia ácida y el smog fotoquímico. Este proceso de acidificación afecta las edificaciones y monumentos históricos, limitando además el crecimiento vegetal y causando el deterioro del agua y el aire.

La gravedad de los efectos y la peligrosidad de los gases NO_x ya se han puesto de manifiesto, lo que ha resaltado la importancia de aplicar técnicas y estrategias para la reducción y eliminación de estos gases. En la actualidad, varias restricciones han sido impuestas por los protocolos de Gotemburgo y Kioto, las cuales se refieren al desarrollo de nuevas tecnologías o a la mejora de los métodos existentes.⁶ Entre las distintas tecnologías disponibles en la actualidad para el control y eliminación de NO_x se pueden mencionar los denominados métodos primarios y secundarios, los cuales se presentan en la figura 1. Los métodos primarios se basan en la prevención de la formación de NO_x mientras que los métodos secundarios se aplican una vez que los NO_x fueron generados y emitidos a la atmósfera.⁷ Entre las tecnologías secundarias más utilizadas para este propósito podemos mencionar los procesos de absorción, quelación y separación de fase. Sin embargo, la mayoría de estas técnicas no son suficientes para llevar a cabo la completa conversión de los gases NO_x , además de que pueden causar contaminación secundaria. Recientemente se ha propuesto una estrategia novedosa y práctica para reducir el NO_x atmosférico y para mejorar la calidad del aire tanto en el exterior como en el interior: la fotocatalisis heterogénea.

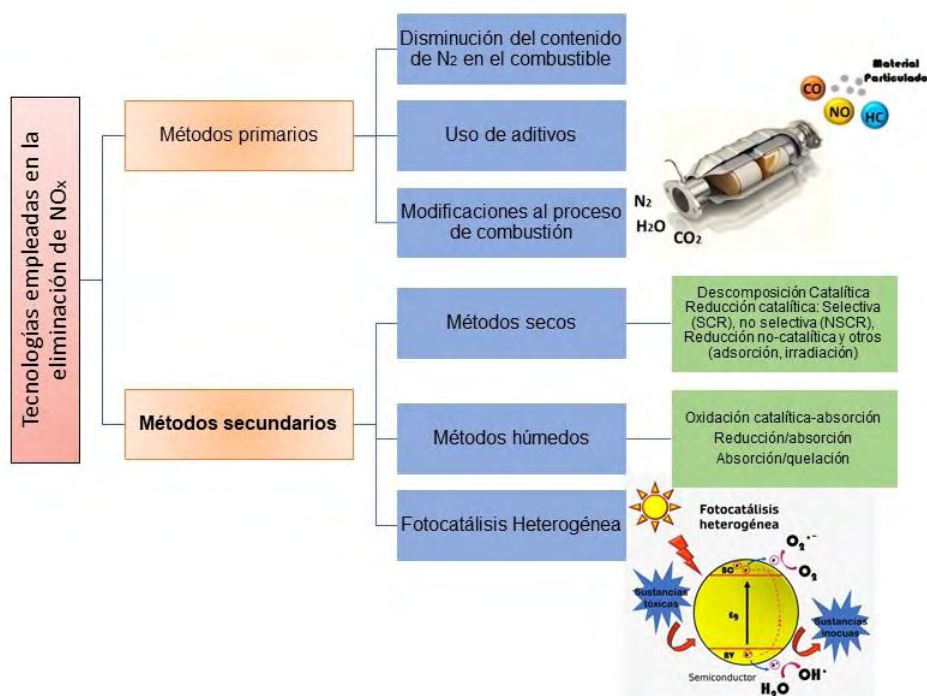


Fig. 1. Tecnologías utilizadas para reducción de contaminantes atmosféricos tipo NO_x .

FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

La fotocatalisis heterogénea pertenece al grupo de las denominadas tecnologías avanzadas de oxidación (TAOs), junto con otros procesos basados en la generación de radicales oxidantes. La fotocatalisis heterogénea es un proceso en el que la radiación electromagnética promueve una serie de reacciones químicas en la superficie de un material fotocatalizador. Los fotocatalizadores son

materiales semiconductores, es decir, materiales que incrementan su conductividad eléctrica cuando son iluminados con una energía específica. Los semiconductores que son estables bajo iluminación visible y ultravioleta típicamente son los óxidos metálicos. En la literatura destaca el empleo de óxidos tales como TiO_2 , ZnO , WO_3 , MoO_3 , Fe_2O_3 y SnO_2 .⁸ Este tipo de semiconductores pueden degradar una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos a sustancias menos tóxicas tanto en fase acuosa como en fase gaseosa. La estructura electrónica de los materiales semiconductores se encuentra caracterizada por una banda de menor energía conocida como banda de valencia en la cual se encuentran los electrones, una banda de mayor energía denominada banda de conducción, la cual se encuentra vacía, y en medio de éstas una región denominada banda de energía prohibida o *band gap* (E_g), en donde ningún electrón puede permanecer.

En la figura 2 se esquematiza el mecanismo de fotocátalisis heterogénea, el cual presenta ciertas similitudes con el proceso natural de fotosíntesis realizado por las plantas, en donde la clorofila tiene la capacidad de absorber la luz solar para convertir el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) en oxígeno (O_2) y glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). En el caso de la fotocátalisis, el semiconductor se activa por un proceso de excitación causado por una radiación incidente de energía apropiada, lo que origina una serie de reacciones químicas que conducen a la descomposición de los contaminantes. El proceso de fotocátalisis inicia de manera inmediata una vez que el óxido semiconductor es irradiado por una fuente de iluminación, generando partículas cargadas eléctricamente como son los electrones y huecos. Un fotón incidente con energía igual o mayor al ancho de banda prohibida del material semiconductor promoverá que un electrón migre de su banda de valencia (BV) a su banda de conducción (BC), dejando un hueco o vacante en la banda de valencia. Los pares electrón-hueco fotogenerados pueden migrar de manera separada hasta la superficie del semiconductor y reaccionar con moléculas de agua y oxígeno adsorbidos para producir especies altamente oxidantes como radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) con un potencial de reducción estándar ~ 2.8 V y aniones superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$).⁹ Estos radicales son muy reactivos y son los que generan la producción de reacciones de oxidación y reducción de los contaminantes hasta degradarlos o transformarlos en sustancias inocuas.

Entre las aplicaciones de la fotocátalisis heterogénea se pueden mencionar la descontaminación del agua, el desarrollo de superficies autolimpiantes, antibactericidas, antivirales y espejos antiempañantes, la conversión de CO_2 y la purificación del aire, principalmente para la eliminación de gases tipo NO_x , SO_x y COVs.^{10,11} Con respecto a otras técnicas de reducción de NO_x , la tecnología de fotocátalisis ofrece múltiples ventajas debido a que el proceso fotocatalítico se realiza a temperatura ambiente y a presión atmosférica, no requiere reactantes químicos adicionales, la activación del material se logra por medio de energía solar o de lámparas, y el fotocatalizador no se consume durante la reacción fotocatalítica. Éstas son razones por las que hoy en día la tecnología de fotocátalisis heterogénea se está posicionando como un prometedor sistema de remediación ambiental.

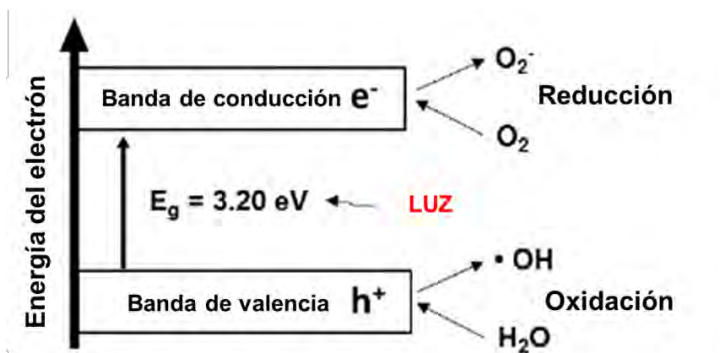


Fig. 2. Esquema representativo de las reacciones principales del proceso fotocatalítico inducidas por irradiación de un semiconductor.

APLICACIÓN DE LA FOTOCATÁLISIS EN MATERIALES DE CONSTRUCCION

El interés por el empleo de la tecnología de fotocatalisis heterogénea ha crecido considerablemente durante las últimas décadas y se ha convertido en una tecnología muy atractiva en el sector de la construcción. Las primeras investigaciones en este rubro fueron realizadas por Italcementi Group y Mitsubishi Companies. Desde entonces se han evaluado los efectos de la adición de óxidos fotocatalizadores a los materiales de construcción, principalmente en pinturas, estucos y materiales base cemento, con el propósito de conferirles propiedades avanzadas, tales como autolimpieza y purificación de aire.^{12,13} En la tabla I se aprecia una amplia gama de productos de construcción comercializados en diferentes países.

En el sector de la construcción, el cemento es el material mayormente utilizado y se encuentra presente de manera continua en casi todos los espacios de nuestra vida diaria, soportando niveles de contaminación elevados. La configuración plana de las fachadas de las edificaciones facilita la exposición del óxido fotocatalizador a la luz; además, la estructura porosa de los materiales base cemento facilita la absorción de los contaminantes. Los óxidos semiconductores pueden ser añadidos a los materiales cementantes en el proceso de mezclado o mediante la aplicación de un revestimiento superficial. El efecto sinérgico del cemento y los óxidos semiconductores, principalmente TiO_2 , ha permitido el desarrollo y la comercialización de nuevos materiales fotocatalíticos capaces de acelerar las reacciones de oxidación.

Tabla I. Materiales de construcción fotocatalíticos comercializado en diferentes países.

Producto	Compañía	Características
TX Active®	Grupo Italcementi	Cemento fotocatalítico. Purificación de aire, específicamente para eliminación de NO_x .
KNOxOUT™	Boysen	Pintura fotocatalítica. Purificación de aire, específicamente para eliminación de NO_x .
AiroCide®	KES Science and Technology	Purificación de aire. Eliminación de contaminantes gaseosos y bacterias.
NOXER	Mitsubishi Materials	Adoquín fotocatalítico. Purificación de aire.
Auranox®	MonierLifetile	Tejas fotocatalíticas para la eliminación de gases NO_x .
Prosolve®	Ellegant Embellishments	Módulos (Baldosas) para la construcción de edificios como smog.
Aircoo®	SunZone	Ventilador de aire fresco que purifica el aire.
Airsopure®	Airtech International	Filtro de aire con propiedades fotocatalíticas.
Airverclean®	Nihon Fujiair	Purificación de aire.
TG Purple®	ToyadaGosei	Purificación de aire para interiores de automóviles con el uso de una lámpara LED.
PF3	ChemSpec	Impermeabilizante con propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes.
NOx-Activ®	Icopal	Láminas impermeabilizantes que purifican el aire.
Photo-Cat®	Purifics Environmental Technologies	Tratamiento de aguas residuales.
PilkingtonActiv™	Pilkington	Vidrio con propiedades autolimpiantes.
Folium	Industrias Pesadas de Kawasaki	Recubrimiento fotocatalítico con propiedades autolimpiantes.
Hydrotech®	Deutsche Steinzeug	Recubrimiento fotocatalítico con propiedades autolimpiantes y antimicrobianas.
Greentek	Thermotek	Impermeabilizante fotocatalítico para la eliminación de gases NO_x .
Oximuro	Niasa	Estuco fotocatalítico para la eliminación de gases NO_x .

Las investigaciones han demostrado que los elementos de construcción fotocatalíticos mantienen las características estéticas de las estructuras de concreto, en particular aquellas basadas en cemento blanco. Adicionalmente, favorecen las reacciones de descomposición de los contaminantes presentes en el aire, tales como NO_x , SO_x , COVs, etc., transformándolos en sustancias inocuas para las personas y el medioambiente, tal y como se puede observar en la figura 3.

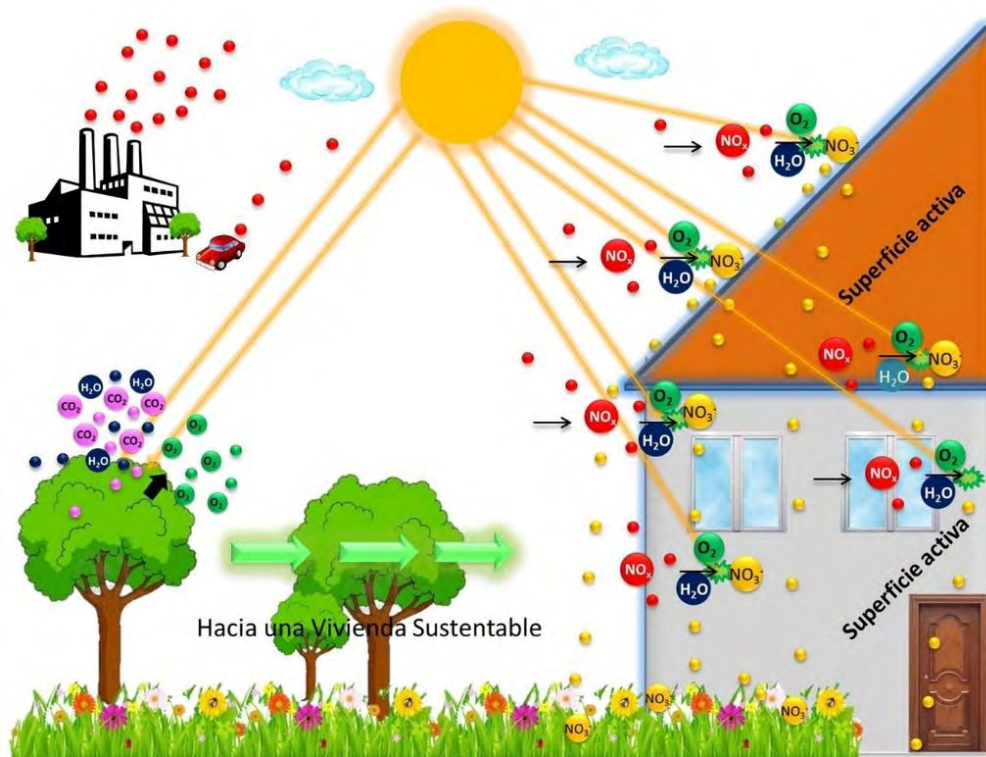


Fig. 3. Fenómeno de fotocatalisis operando en una vivienda.¹⁴

El proceso de fotooxidación de NO_x se puede describir mediante una serie de reacciones que tienen lugar durante el proceso fotocatalítico (ecuaciones 1-6), en donde los radicales hidroxilo e iones superóxido actúan como oxidantes fuertes, oxidando el óxido nítrico (NO) a dióxido de nitrógeno (NO_2) en un primer paso y posteriormente el NO_2 a iones nitrato NO_3^- .¹⁵ Estos subproductos inocuos de reacción (iones nitrato) pueden ser eliminados de la superficie del cemento mediante el agua de lluvia o a través de procesos de lavado.



Hoy en día ya existen algunas edificaciones relevantes que han sido construidas con materiales fotocatalíticos. La iglesia Dives in Misericordia, en Roma, fue el primer edificio que utilizó paneles prefabricados de concreto fotocatalítico blanco con adición de TiO_2 (TX Millenium). Uno de los principales motivos del uso de cementos fotocatalíticos con base de TiO_2 , era que el color del concreto permaneciera blanco e inalterable al paso del tiempo debido a su efecto autolimpiante. La Ciudad de

la Música y las Bellas Artes de Chambéry, Francia, es otro ejemplo de construcción con materiales fotocatalíticos. En México, una aplicación de la tecnología de fotocatálisis es la fachada de la Torre de Especialidades del Hospital General “Manuel Gea González”, ubicado en la Ciudad de México (figura 4). Esta fachada instalada en el año 2012 es el primer edificio en México y Latinoamérica que cuenta con una fachada fotocatalítica a base de un sistema de losas arquitectónicas decorativas con recubrimiento de TiO_2 nanométrico. Los módulos articulados que conforman la estructura están diseñados para facilitar la circulación del aire por la superficie, permitiendo un mayor contacto de los contaminantes atmosféricos con el fotocatalizador TiO_2 . Los proveedores informan que el edificio es capaz de eliminar la contaminación del aire generada por mil vehículos diariamente.¹⁶



Fig. 4. Primer edificio fotocatalítico en México.¹⁶

TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS

El empleo de la fotocatálisis como tecnología de vanguardia en la remediación de problemáticas como la contaminación del aire demanda óxidos semiconductores con características que los hagan más eficientes y a la vez rentables para su incorporación en matrices de materiales de construcción como el cemento. Si bien es cierto que el TiO_2 en su forma cristalina anatasa es el semiconductor utilizado en las aplicaciones de productos comerciales, la modificación de su proceso de fabricación para optimizar costos y aumentar su eficiencia fotocatalítica sigue siendo un reto para la comunidad científica enfocada en el tema. Por esta razón, el uso de semiconductores alternos al TiO_2 se vislumbra como una opción poco probable desde el punto de vista económico.

La aplicación de la fotocatálisis en materiales de construcción representa una interesante propuesta toda vez que, al estar expuestas las edificaciones a la radiación solar, éstas pueden actuar directamente en la eliminación de contaminantes atmosféricos a la par de las áreas verdes que existen en parques y plazas de las grandes ciudades.

El cemento es uno de los principales materiales utilizados en la industria de la construcción y se encuentra bien posicionado comercialmente debido a sus atributos como finura, fluidez, densidad, tiempo de fraguado, expansión y propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y flexión. Esto asegura un mercado cautivo base para el desarrollo de nuevos productos fotocatalíticos que le permitiría posicionarse rápidamente desde el punto de vista de su distribución y comercialización. Los principales productores nacionales de cemento son Cementos Mexicanos (Cemex), Holcim Apasco, Cementos y Concretos Nacionales (CYCNA), Cementos Moctezuma, entre otros, lo que crea un mercado altamente prometedor para posicionar cementos comerciales e impacta directamente en el costo final del producto.

La fabricación de los cementos y morteros fotocatalíticos no representa una modificación en la infraestructura de las industrias cementeras, toda vez que la incorporación del material activo se puede

dar en fase seca utilizando los molinos y mezcladoras ya existentes. El aspecto cultural que tenemos como sociedad es también otro punto a considerar, por lo que se requiere de una vasta estrategia comercial que invite al cliente a invertir en la compra de un producto que le brinde un entorno de aire más puro. La acción aditiva de recubrir las paredes de un complejo habitacional, edificios y fachadas, más que un esfuerzo aislado individualizado, producirá un efecto similar a la forestación realizada en parques mediante la plantación de árboles. La idea es mimetizar la cultura que tenemos desarrollada sobre la importancia de la existencia de los árboles en el ciclo del contaminante CO₂ para trasladarla a la conciencia colectiva de la sociedad para el caso de los gases NO_x.

Lo anterior debe verse acompañado de leyes gubernamentales que impulsen la reducción de contaminantes tipo NO_x de manera preventiva, pero igualmente de manera correctiva mediante la regulación de las especificaciones de los materiales de construcción de las casas habitación y edificios.

REFERENCIAS

1. Balbuena J., Cruz-Yusta M., Cuevas A.L., López-Escalante M.C., Martín F., Pastor A. y Sánchez L. (2016). Enhanced activity of α -Fe₂O₃ for photocatalytic NO removal. *RSC Adv.*, 6, 92917–92922. doi:10.1039/c6ra19167c.
2. Li S., Feng K. y Li M. (2017). Identifying the main contributors of air pollution in Beijing, *J. Clean. Prod.*, 163, S359–S365. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.127.
3. Hüsken G., Hunger M. y Brouwers H.J.H. (2009). Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. *Build. Environ.*, 44, 2463–2474. doi:10.1016/j.buildenv.2009.04.010.
4. Prinz A.L. y Richter D.J. (2019). Long-term exposure to fine particulate matter air pollution: An ecological study of its effect on COVID-19 cases and fatality in Germany. *Environ. Res.*, 204, 111949. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111948>.
5. Graber M., Mohr S., Baptiste L., Duloquin G. y Blanc-Labarre C. (2019). Air pollution and stroke. A new modifiable risk factor is in the air. *Environ. Neurol. Air.*, 2055, 1–6. doi:10.1016/j.neurol.2019.03.003.
6. Van Vuuren D.P., Cofala J., Eerens H.E., Oostenrijk R., Heyes C., Klimont Z., Den Elzen M.G.J. y Amann M. (2006). Exploring the ancillary benefits of the Kyoto Protocol for air pollution in Europe. *Energy Policy*, 34, 444–460. doi:10.1016/j.enpol.2004.06.012.
7. Ângelo J., Andrade L., Madeira L.M. y Mendes A. (2013). An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement. *J. Environ. Manage.*, 129, 522–539. doi:10.1016/j.jenvman.2013.08.006.
8. Ganie A.S., Bano S., Khan N., Sultana S., Rehman Z., Rahman M.M., Sabir S., Coulon F. y Khan M.Z. (2021). Nanoremediation technologies for sustainable remediation of contaminated environments: Recent advances and challenges. *Chemosphere*, 275, 130065. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130065.
9. Saravanan R., Gracia F. y Stephen A. (2017). Basic Principles, Mechanism, and Challenges of Photocatalysis. En Khan M.M., Pradhan D. y Sohn Y. (Eds), *Nanocomposites for Visible Light-induced Photocatalysis* 19–40. Springer Link. doi:10.1007/978-3-319-62446-4.
10. Banerjee S., Dionysiou D.D. y Pillai S.C. (2015). Environmental Self-cleaning applications of TiO₂ by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. *Applied Catal. B, Environ.*, 176–177, 396–428. doi:10.1016/j.apcatb.2015.03.058.
11. Fujishima A., Rao. T.N. y Tryk D.A., Titanium dioxide photocatalysis. (2000). *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1, 1–21, [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(00\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2).
12. Ibrahim R.K., Hayyan M., Hayyan A. y Ibrahim S. (2016). Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23, 13754–13788. doi:10.1007/s11356-016-6457-z.

13. Ratan J.K. y Saini A. (2019). Enhancement of photocatalytic activity of self-cleaning cement. *Mater. Lett.*, 244, 178-181. doi:10.1016/j.matlet.2019.02.065.
14. Luévano-Hipólito E. y Martínez-de Cruz A. (2018). Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real weatherism. *Constr. Build. Mater.* 174, 302–309. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.095.
15. Chen J. y Poon C.S. (2009). Photocatalytic activity of titanium dioxide modified concrete materials-influence of utilizing recycled glass cullets as aggregates. *J. Environ. Manage.*, 90 3436-3442. doi:10.1016/j.jenvman.2009.05.029.
16. Salla F. (10 de marzo de 2014). *Proyectos Rhino: La fachada que se come la contaminación*. Recuperado de VisualARQ: <https://www.visualarq.com/es/proyectos-rhino-la-fachada-que-se-come-la-contaminacion/>

Sustentabilidad de materiales para el envasado de refrescos implementando un Análisis de Ciclo de Vida mediante SolidWorks Sustainability

Roberto Carlos Cabriaes Gómez, Yessica Marlen Arroyo Mayorga, Diana Cobos Zaleta,
Luis Arturo Reyes Osorio
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
roberto.cabriaesgm@uanl.edu.mx, yessica.arroyomrg@uanl.edu.mx, diana.coboszl@uanl.edu.mx,
Luis.reyessr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo utiliza el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) a través de SolidWorks Sustainability para evaluar el impacto ambiental de envases de vidrio, aluminio y PET de 355 ml utilizados por Coca-Cola en México. Los cuatro impactos medidos incluyen la huella de carbono, consumo de energía, acidificación atmosférica y eutrofización del agua. Se analizan etapas desde la selección del material hasta el fin de vida útil, considerando factores como región de fabricación, tiempo de uso, proceso de fabricación y transporte. Se emplean datos de SEMARNAT, la Cámara de Diputados, FEMSA y Arca Continental para obtener resultados y comparar la sustentabilidad de los materiales de envasado.

PALABRAS CLAVE

Desarrollo sostenible, impactos ambientales, envases de refrescos, Análisis de Ciclo de Vida (LCA).

ABSTRACT

This work employs Life Cycle Assessment (LCA) using SolidWorks Sustainability to assess the environmental impact of 355 ml glass, aluminum, and PET packaging used by Coca-Cola in Mexico. The four measured impacts include carbon footprint, energy consumption, atmospheric acidification, and water eutrophication. It analyzes stages from material selection to end-of-life, considering factors such as manufacturing region, usage period, production process, and transportation. Data from SEMARNAT, the Chamber of Deputies, FEMSA, and Arca Continental are used to obtain results and compare the sustainability of packaging materials.

KEYWORDS

Sustainable development, environmental impacts, soft drink packaging, Life Cycle Assessment (LCA).

INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.¹

En la actualidad, se busca lograr el desarrollo sostenible mediante el estudio de los posibles impactos ambientales asociados con bienes de consumo y servicios. Esto ha aumentado el uso de métodos para una mejor comprensión de estos impactos, a fin de reducirlos.

Los refrescos son productos de alto consumo en nuestra sociedad, y para facilitar su distribución, se requiere utilizar envases. Esto implica procesos productivos que generan una serie de impactos ambientales. Por tanto, la industria refresquera se ve obligada a desarrollar estrategias de sostenibilidad centradas en la producción y reciclaje de los materiales de envasado.

El Poli-tereftalato de etileno (PET), el vidrio y el aluminio son los principales materiales utilizados. De entre estos, el PET es el más empleado debido a su facilidad de procesamiento y menor costo, además de su versatilidad y resistencia. Sin embargo, el porcentaje de PET reciclado es mínimo en comparación con su alta producción y amplio uso. Como resultado, la cantidad de residuos plásticos generados es alarmante, pues se ha convertido en un grave problema ambiental. Por ello, el análisis de los impactos de este material ha sido el foco de la investigación ambiental.

Desde una perspectiva científica, es necesario considerar todos los efectos ambientales, cuantificándolos con valores y cantidades de acuerdo a metodologías estandarizadas respaldadas por organismos internacionales. El análisis, cálculo y evaluación de los impactos ambientales asociados con la producción de los materiales de envasado de refrescos en las diferentes etapas de su ciclo de vida contribuye a la toma de medidas tecnológicas y ambientalmente responsables para lograr un desarrollo sostenible real. Esto se logra a través de un Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés *Life Cycle Assessment*).

El origen del Análisis de Ciclo de Vida se remonta a 1969 cuando en EE. UU. The Coca Cola Company financió un estudio que tenía como objetivo la reducción del consumo de recursos ya que inicialmente se consideraba que el consumo energético tenía mayor prioridad respecto a la generación de residuos, las descargas y emisiones hacia el medioambiente,² que posteriormente evolucionó y dio lugar a esta herramienta LCA para evaluar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o proceso.

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta reconocida y aceptada por la comunidad científica e industrial, puesto que permite la toma de decisiones referentes a políticas ambientales y de sustentabilidad. Existen distintos estudios que implementan dicha herramienta. Por ejemplo, en³ evalúan el proceso de fabricación de envases de vidrio. Sin embargo, no se reportan resultados que cuantifiquen los impactos ambientales asociados a cada uno de los procesos de manufactura involucrados.



Fig. 1. Etapas del ciclo de vida del producto.⁴

En un primer momento, realizar un Análisis de Ciclo de Vida se mostraba como un procedimiento agotador, dado que involucraba la recopilación y gestión de datos con el fin de evaluar los impactos ambientales. En la actualidad, estos estudios son realizados mediante el uso de bases de datos de Inventarios de Ciclo de Vida y softwares comerciales. Esto posibilita la comparación del impacto ambiental entre distintos materiales.⁵

En este contexto SolidWorks Sustainability es una herramienta accesible que está integrada de SolidWorks. Fundamentalmente, se trata de un LCA de comprobación, la cual permite realizar la evaluación del ciclo de vida de un producto durante el diseño. Esto perfecciona el proceso si se debe realizar una revisión de cumplimiento completa certificada por la ISO 14044:2006, la cual especifica los requisitos y ofrece directrices concretas para la realización de un LCA. Entre ellos se encuentran: la definición del objetivo y el alcance del LCA, la fase de interpretación del ciclo de vida, el informe final y la revisión crítica.⁶

Ahora bien, el bajo desarrollo tecnológico en reciclaje de latas de aluminio genera que más del 50 % se exporte a Estados Unidos, donde las transforman en artículos diversos que van desde nuevamente latas de alimentos y/o bebidas, hasta material de construcción o autopartes, consumida en mayor parte por el sector automotriz. La producción de aluminio a partir de aluminio reciclado requiere un 90 % menos de energía que hacerlo a partir del mineral.⁷

En cuanto al vidrio, el hecho de que sus envases se puedan reciclar al cien por ciento sin pérdida de calidad ni cantidad, contribuye a la percepción de ser un material calificado como sustentable.⁸ Sin embargo, el proceso de soplado con que se fabrica el vidrio es una actividad que requiere de mucha energía. El gas natural, el combustóleo y la electricidad son las fuentes de energía primordiales este proceso.⁹



Fig. 2. Principales embotelladoras en México que se incluyen en este trabajo.¹⁰

En 2002 el Gobierno del Distrito Federal reportó que en México la mayoría de la resina de PET se emplea en la fabricación de botellas para contener refrescos, con el 52.8 %. En México se comenzó a utilizar para la fabricación de botellas a partir de 1985, teniendo gran aceptación por parte del

consumidor, por lo que su uso se ha incrementado considerablemente año tras año.¹¹ Nadie se sorprende de que Coca-Cola sea la bebida carbonatada más consumida en México. Las dos principales embotelladoras del sistema Coca-Cola con una destacada presencia en el territorio mexicano son Coca-Cola Femsa y Arca Continental (figura 2).

A partir de estas consideraciones, la hipótesis de esta investigación plantea que al utilizar un software de Análisis de Ciclo de Vida, es posible obtener una comprensión precisa del impacto ambiental real del PET en comparación con otras opciones de envasado. La intención es desmitificar la creencia común de que el vidrio es la elección más ecológica. Al desafiar y explorar estas concepciones arraigadas, el estudio aspira a aportar de manera significativa al conocimiento sobre la sostenibilidad de los materiales de envasado en la industria de bebidas. Se busca proporcionar información valiosa para la toma de decisiones informadas y fomentar prácticas más sostenibles en la gestión de envases.

Este trabajo evalúa la sustentabilidad de tres envases fabricados de vidrio, aluminio y PET utilizados en el envasado de refrescos, implementando un Análisis de Ciclo de Vida mediante la herramienta SolidWorks Sustainability. La base de datos que utiliza SolidWorks Sustainability es un conjunto de impactos ambientales obtenidos a través de una combinación de experimentación científica y resultados empíricos adquiridos en campo, pertenecientes a GaBi, que es un software y base de datos de referencia en sustentabilidad. Simultáneamente, emplea la herramienta y metodología TRACI de evaluación del impacto desarrollada por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos, la cual proporciona factores de caracterización para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA, por sus siglas en inglés), la ecología industrial y las métricas de sostenibilidad.

METODOLOGÍA

Modelado de sólidos 3D

Las mediciones de los tres tipos de envases (vidrio, aluminio y PET), cada uno de 355 ml, se llevaron a cabo utilizando instrumentos como balanza de precisión, regla métrica y calibrador vernier digital.

Una vez obtenidas las medidas reales, se realiza el diseño de los sólidos 3D utilizando el programa SolidWorks 2021 (figura 3), considerando la máxima precisión posible en cuanto a la masa y tamaño de los objetos reales. Posteriormente, se aplicó el material correcto de acuerdo al envase simulado (vidrio, aluminio o PET). Finalmente, se aplicó una apariencia de renderizado de manera que el modelo mostrara la mayor semejanza posible con el original.



Fig. 3. Envases utilizados en el estudio junto a sus modelos 3D renderizados.¹⁰

Diseño de Experimentos

Se definieron los escenarios o experimentos de simulación ejecutados. Esto consistió en la adecuada manipulación de las variables vinculadas al material, fabricación, utilización, transporte y fin de vida útil. Esto nos permite medir el efecto relacionado con el impacto medioambiental y la sustentabilidad del material. Se establecieron cuatro casos de estudio con datos reales:

- Caso I, Nivel Nacional, considerando datos reportados por SEMARNAT y la Cámara de Diputados de México.^{12, 13}
- Caso II, Nivel Regional, de acuerdo con datos reportados por la Planta Jalisco de Coca-Cola Arca Continental con distribución a San Luis Potosí.^{14, 15}
- Caso III, Nivel Estatal, considerando datos reportados por la Planta San Cristóbal de las Casas de Coca-Cola FEMSA con distribución a Tuxtla Gutiérrez, en el mismo estado de Chiapas.¹⁶
- Caso IV, Nivel Interestatal, a partir de los datos emitidos por Planta Toluca de Coca-Cola FEMSA con distribución a CDMX. En este caso de estudio se evalúa únicamente aluminio y PET, dado que la Planta Toluca descarta la producción de envases de vidrio.¹⁷

Se establecieron la misma región de fabricación, el mismo período de duración y la misma región de utilización como parámetros constantes en los cuatro casos. Por otro lado, las principales diferencias fueron el contenido de material reciclado y el proceso de manufactura utilizado (tabla I).

Tabla I. Parámetros iniciales establecidos en el análisis para los casos I, II, III y IV.

Variables	Vidrio	Aluminio	PET
Región de fabricación	Norteamérica	Norteamérica	Norteamérica
Contenido de reciclado	20%	0%	0%
Período de duración	1 año	1 año	1 año
Proceso	Personalizado	Chapa metálica troquelada/conformada	Moldeo por inyección
Pintura	Sin pintura	Pintura con disolvente	Sin pintura
Región de utilización	Norteamérica	Norteamérica	Norteamérica
Período de utilización	1 año	1 año	1 año

Más aún, se establecieron las variables dependientes de cada caso, tales como la distancia en kilómetros de transporte terrestre. La variable de control que puede afectar los resultados es el fin de la vida útil, expresado en el porcentaje de la cantidad de material reciclado, incinerado o enviado como desecho a vertederos o rellenos sanitarios. (tabla II).

Tabla II. Variables dependientes y variables de control para los casos I, II, III y IV.

Caso	Variables	Vidrio	Aluminio	PET
1 Nivel nacional	Transporte terrestre	2575 km	2575 km	2575 km
	Fin de vida útil	Reciclado: 12% Incinerado: 0% Vertedero: 88%	Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 20% Incinerado: 10% Vertedero: 70%
2 Nivel regional	Transporte terrestre	773 km	773 km	773 km
	Fin de vida útil	Reciclado: 93% Incinerado: 0% Vertedero: 7%	Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 60% Incinerado: 10% Vertedero: 30%
3 Nivel estatal	Transporte terrestre	61 km	61 km	61 km
	Fin de vida útil	Reciclado: 93% Incinerado: 0% Vertedero: 7%	Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 50% Incinerado: 10% Vertedero: 40%
4 Nivel interestatal	Transporte terrestre		65 km	65 km
	Fin de vida útil		Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 50% Incinerado: 5% Vertedero: 45%

Después de configurar los materiales y de ejecutar SolidWorks Sustainability, el software proporciona información sobre el impacto ambiental del diseño en términos de huella de carbono, energía consumida, agua utilizada y otros indicadores (figura 4).

En concreto, el software evalúa cuatro impactos ambientales: huella de carbono, energía total consumida, acidificación del aire y eutrofización del agua.

Huella de carbono: La huella de carbono es una medida de la cantidad total de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO_2), liberados a la atmósfera como resultado de las actividades humanas o de la producción de un producto específico. Se expresa comúnmente en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) y se utiliza para evaluar el impacto climático de una actividad o producto.

Energía total consumida: La energía total consumida se refiere a la cantidad total de energía utilizada en todas las etapas del ciclo de vida de un producto o proceso. Esto incluye la energía necesaria para extraer materias primas, fabricar, transportar, utilizar y desechar el producto. Se mide generalmente en unidades de energía, como joules (J) o megajoules (MJ).

Acidificación del aire: La acidificación del aire se refiere al aumento de la acidez de la atmósfera debido a la liberación de compuestos químicos ácidos, como óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), a través de actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles. Esta acidificación puede tener efectos negativos en el medio ambiente, incluyendo la degradación de suelos y cuerpos de agua. La acidificación del aire se presenta en unidades de equivalentes en ácido PH/kg con factores de ponderación siguientes: 31.25 equivalentes de ácido/kg para el SO_2 , 21.74 equivalentes de ácido/kg para el NO_2 .

Eutrofización del agua: La eutrofización del agua es un proceso en el cual los cuerpos de agua, como ríos, lagos y embalses, reciben un exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, generalmente a través de la escorrentía agrícola o el vertido de aguas residuales. Esto puede conducir a un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, al agotamiento de oxígeno y demás problemas ambientales, como la muerte de peces y la degradación de la calidad del agua. La unidad de medida típica para evaluar el impacto de la eutrofización del agua es la concentración de nutrientes, expresada comúnmente en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm).

Estas métricas ayudan a tomar decisiones informadas para reducir el impacto ambiental y fomentar la sostenibilidad.

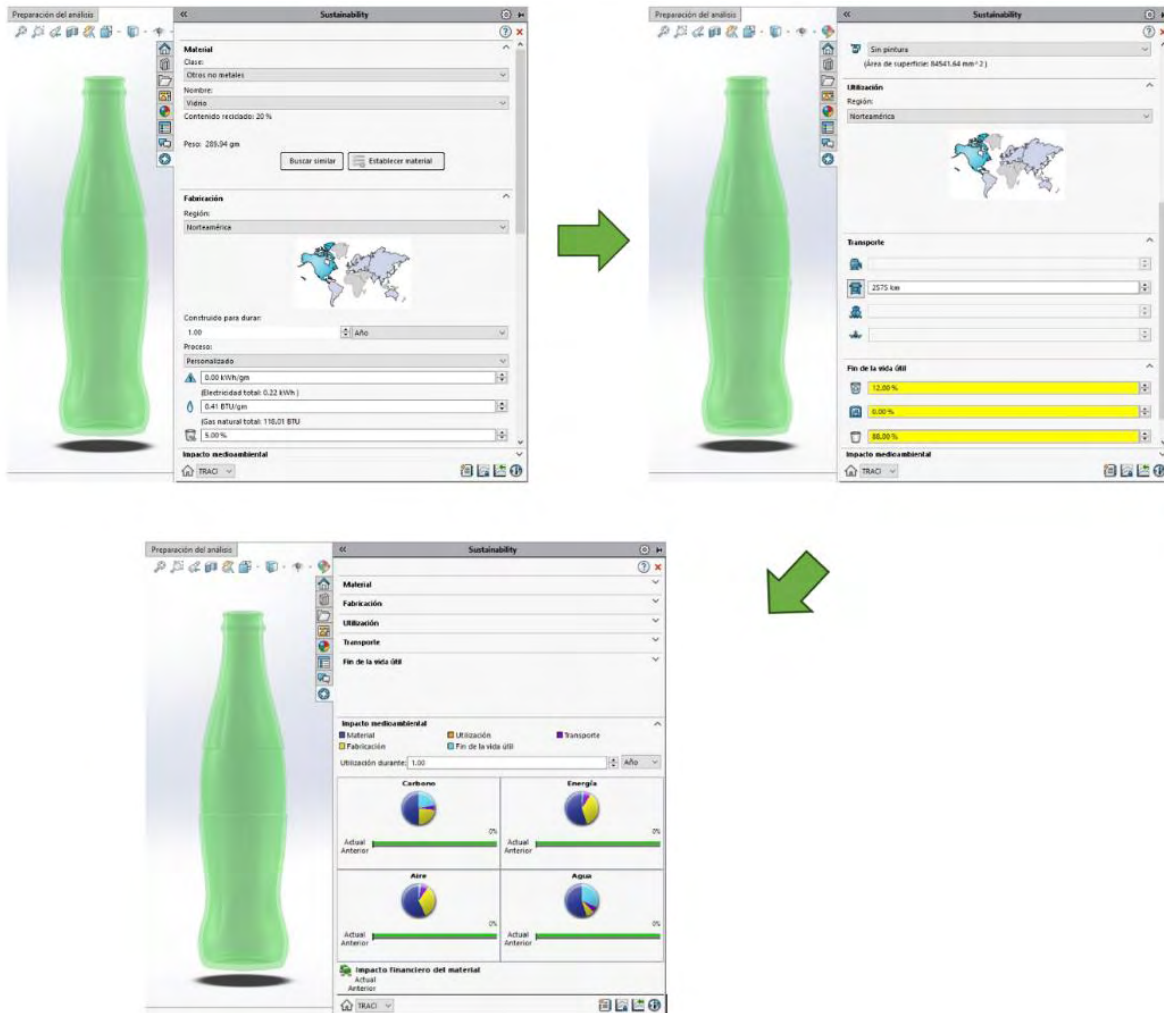


Fig. 4. Flujo de trabajo de SolidWorks Sustainability una vez que se tiene el modelo 3D.

RESULTADOS

Caso de estudio I

En la tabla III se presentan los resultados totales del impacto ambiental evaluado para cada uno de los materiales analizados en el Caso de estudio I. En todos los impactos evaluados, el vidrio muestra el mayor impacto ambiental, seguido por el aluminio y el PET.

Hay que destacar que la mayor parte del impacto ambiental se genera durante las etapas de obtención del material y fabricación.

En la figura 6 se proporciona un desglose detallado de los resultados totales de impacto ambiental por cada envase, dividiéndolos en categorías que incluyen la obtención del material, el proceso de fabricación, el transporte y el reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores representa el impacto total en las unidades correspondientes.

Tabla III. Comparativa de resultados para caso de estudio I (análisis nacional) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Vidrio	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.813 kg CO ₂ e	0.301 kg CO ₂ e	0.095 kg CO ₂ e
Energía total consumida	7.6 MJ	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.172 mol H ⁺ e	0.078 mol H ⁺ e	0.017 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	2.4E-4 kg N e	3.6E-5 kg N e	1.2E-5 kg N e

Caso de estudio II

La tabla IV presenta los resultados totales correspondientes al Caso de estudio II. La diferencia principal con respecto al Caso I radica en una menor distancia recorrida durante la distribución del producto, así como en un mayor porcentaje de reciclaje de vidrio y PET, según datos reportados por Arca Continental. Se observa que, en el caso del vidrio, hay una disminución en las métricas de los cuatro impactos ambientales evaluados, en comparación con el Caso I. Esto se atribuye a la menor distancia recorrida en el análisis y al aumento de su reciclaje. Sin embargo, es importante destacar que el vidrio prevalece como el material con el mayor impacto ambiental. Por otro lado, es relevante destacar la disminución en la energía total consumida en el estudio del vidrio, debido a que se considera un mayor uso de material reciclado basado en datos de Arca Continental, que recicla más vidrio en comparación con el promedio nacional (dato utilizado en el Caso I).

Al reducir la distancia recorrida para la distribución, el aluminio muestra una menor huella de carbono y eutrofización del agua. Se sitúa en segundo lugar en cuanto a impacto ambiental. Por su parte, el PET exhibe el menor impacto y presenta una disminución en su huella de carbono, acidificación atmosférica y eutrofización del agua. Esto se atribuye al aumento de su reciclaje.

La figura 7 presenta los resultados para cada material. Se muestran los cuatro impactos desglosados en valores asociados a la obtención del material, proceso de fabricación, transporte y reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores proporciona el total de la métrica correspondiente al impacto en sus respectivas unidades.

Tabla IV. Comparativa de resultados para Caso de estudio II (análisis regional) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Vidrio	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.623 kg CO ₂ e	0.299 kg CO ₂ e	0.089 kg CO ₂ e
Energía total consumida	7.1 MJ	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.160 mol H ⁺ e	0.078 mol H ⁺ e	0.016 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	1.6E-4 kg N e	3.5E-5 kg N e	9.3E-6 kg N e

Caso de estudio III

La tabla V presenta los resultados totales correspondientes al Caso de estudio III. La principal diferencia con respecto a los Casos I y II es una menor distancia durante el recorrido para la distribución del producto, además de una disminución en el porcentaje de reciclado durante el fin de vida útil del PET, según datos reportados por FEMSA. Se observa un cambio en las métricas de impacto para el vidrio y el PET. Se registra una menor acidificación atmosférica y huella de carbono, además de una ligera disminución en la energía total consumida durante el estudio del vidrio. Esto se debe a que, en este análisis, se establece un mayor reciclaje del vidrio en comparación con el promedio nacional (dato utilizado en el Caso I) y una distancia de recorrido menor que la establecida en los Casos I y II.

Por otro lado, debido al menor reciclado de PET, se observa un ligero incremento en la huella de carbono y en la eutrofización del agua.

El vidrio continúa siendo el material con el mayor impacto ambiental, seguido por el aluminio en segunda posición y posteriormente el PET.

La figura 8 presenta los resultados para cada material. Se señalan los cuatro impactos desglosados en valores asociados a la obtención del material, proceso de fabricación, transporte y reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores proporciona el total de la métrica correspondiente al impacto en sus respectivas unidades.

Tabla V. Comparativa de resultados para Caso de estudio III (análisis estatal) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Vidrio	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.613 kg CO ₂ e	0.299 kg CO ₂ e	0.090 kg CO ₂ e
Energía total consumida	6.9 MJ	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.156 mol H ⁺ e	0.078 mol H ⁺ e	0.016 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	1.6E-4 kg N e	3.5E-5 kg N e	9.6E-6 kg N e

Caso de estudio IV

La tabla VI presenta los resultados totales del impacto ambiental evaluado para el aluminio y el PET. Las principales diferencias con respecto a los Casos I y II incluyen una menor distancia de recorrido durante la distribución, aunque mayor en comparación con el Caso III. Además, se registra una disminución en el porcentaje de material incinerado durante el fin de vida útil del PET, según datos reportados por FEMSA. En este caso de estudio se evalúa únicamente aluminio y PET, dado que la Planta Toluca descarta la producción de envases de vidrio.

En el caso del aluminio, no se observan diferencias significativas en sus impactos al compararlo con los Casos de estudio II y III. No obstante, su impacto ambiental sigue siendo menor en comparación con el Caso de estudio I, debido a la mayor distancia de recorrido en este último.

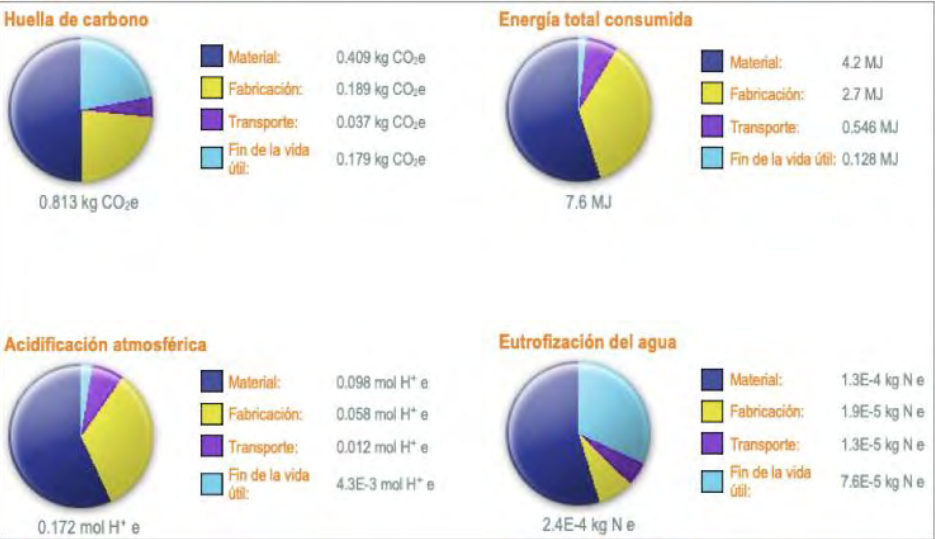
Por otro lado, el PET muestra una disminución en su huella de carbono y eutrofización del agua en comparación con los Casos de estudio I, II y III.

La figura 9 ofrece un desglose detallado de los resultados totales de impacto ambiental en valores correspondientes a la obtención del material, proceso de fabricación, transporte y reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores representa el impacto total en las unidades correspondientes.

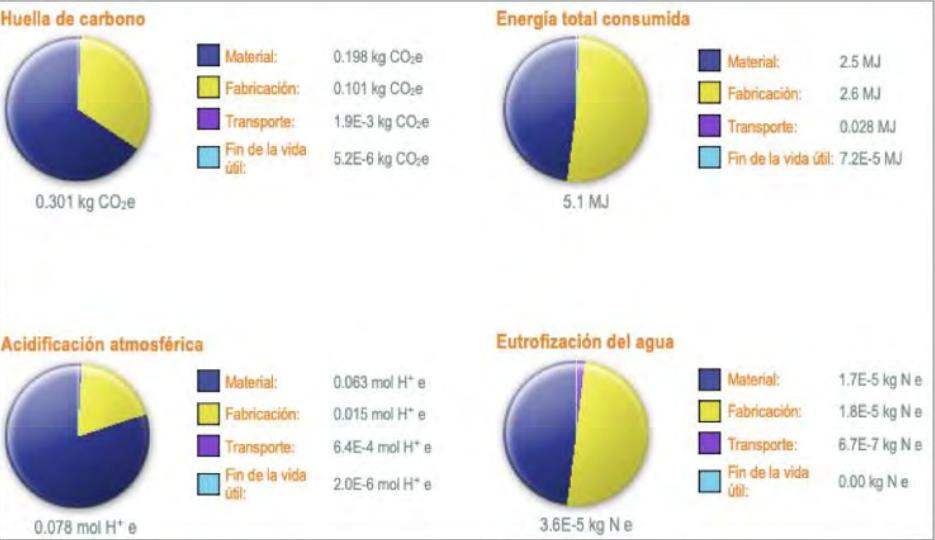
Tabla VI. Comparativa de resultados para Caso de estudio IV (nivel interestatal) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.299 kg CO ₂ e	0.089 kg CO ₂ e
Energía total consumida	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.078 mol H ⁺ e	0.016 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	3.5E-5 kg N e	9.8E-6 kg N e

Botella de
vidrio



Lata de
aluminio



Botella de
PET

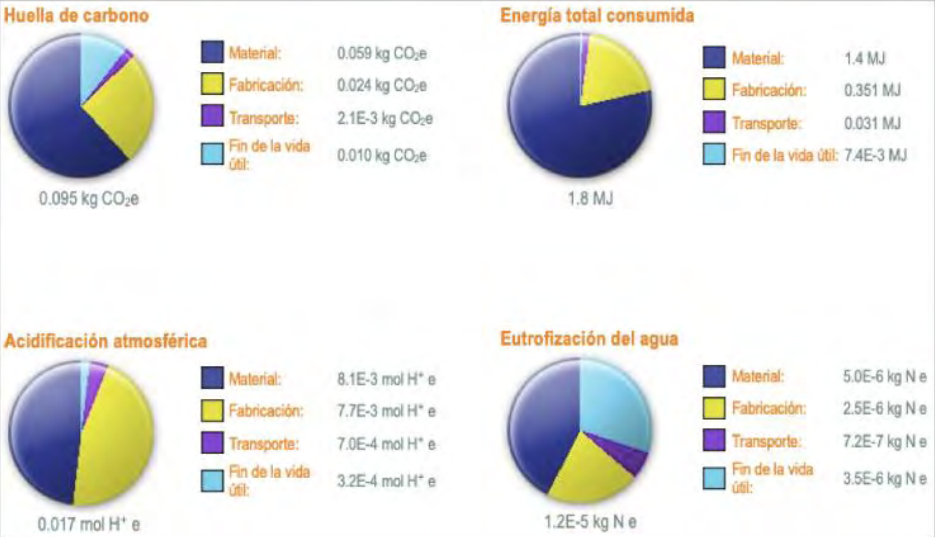
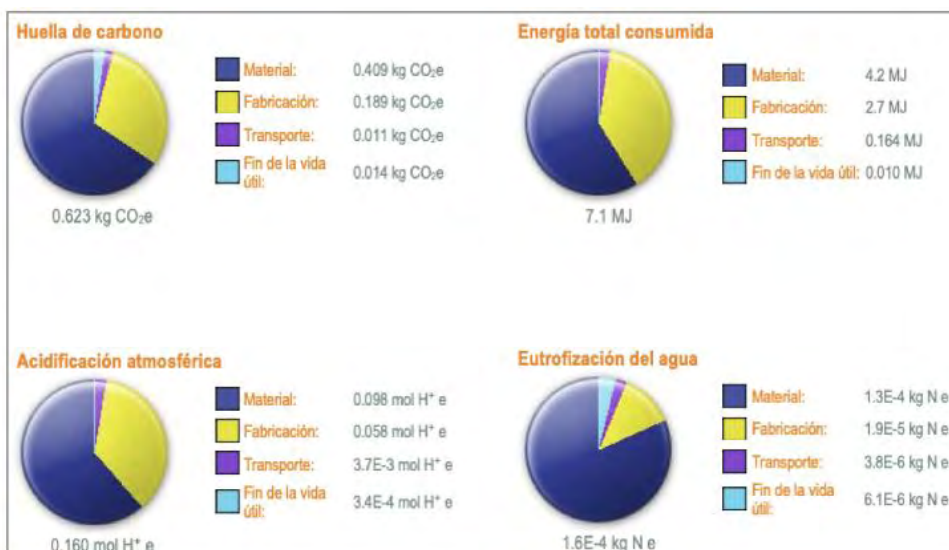


Fig. 6. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio I (análisis nacional).

Botella de vidrio



Lata de aluminio



Botella de PET

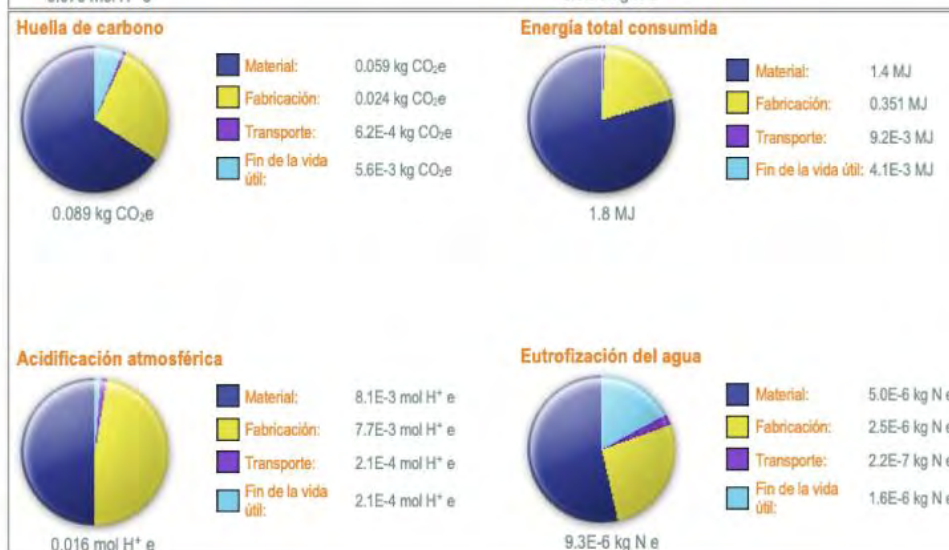
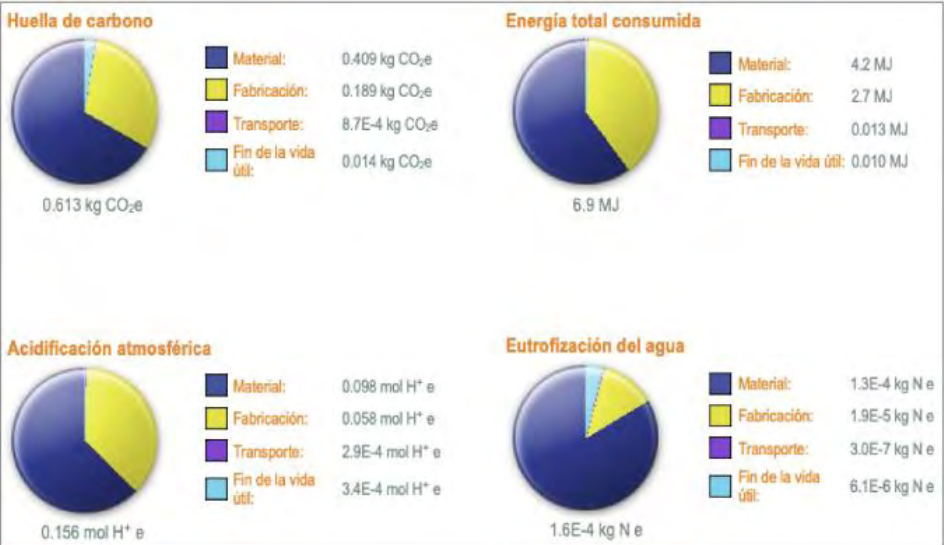
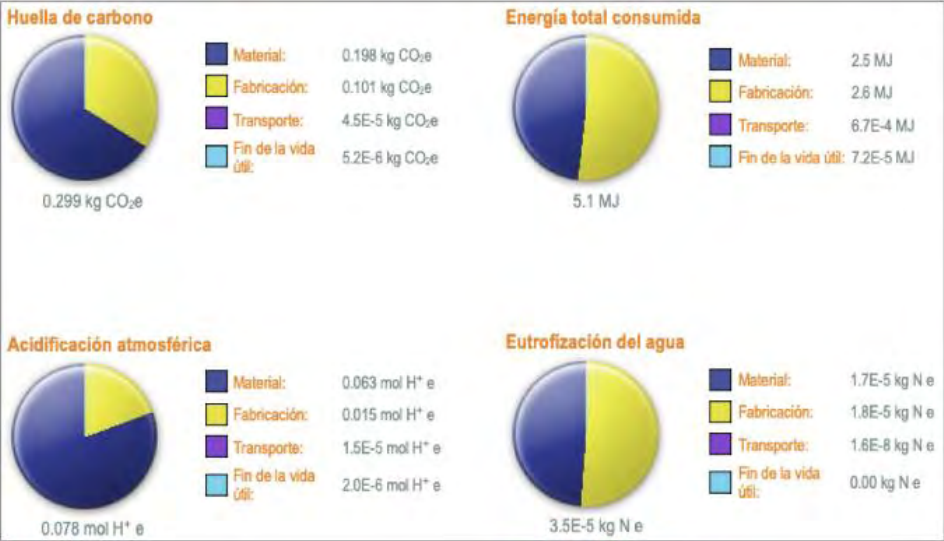


Fig. 7. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio II (análisis regional).

Botella de
vidrio



Lata de
aluminio



Botella de
PET

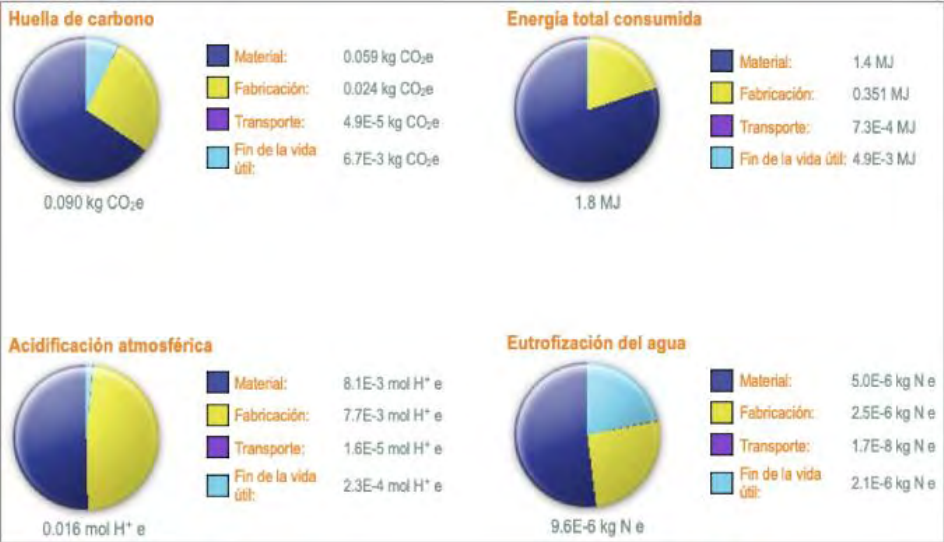


Fig. 8. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio III (análisis estatal).

Lata de aluminio



Fig. 9. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio IV (análisis inter-estatal).

CONCLUSIONES

Basado en una metodología científica establecida, nuestro estudio arroja resultados reveladores sobre el impacto ambiental de diferentes materiales de envasado de bebidas. Contrarios a la creencia popular de que el vidrio es el material más sostenible, nuestros hallazgos indican que el PET es el material que genera el menor impacto en todos los indicadores ambientales evaluados. En este contexto, el vidrio se destaca por ser el material que produce el mayor impacto en términos de huella de carbono, consumo de energía, acidificación del aire y eutrofización del agua. Le sigue el aluminio, el cual, pese a su versatilidad, requiere una cantidad significativamente mayor de energía en su proceso de producción, lo que resulta en una mayor huella de carbono en comparación con un polímero como el PET. El impacto ambiental asociado al vidrio durante su fabricación se debe principalmente a su alto punto de fusión y su masa, que son mayores en comparación con el aluminio y el PET. Esto implica que se necesita una cantidad considerablemente mayor de energía para reblandecer y procesar el vidrio. En cuanto a los impactos relacionados con la acidificación atmosférica y la eutrofización del agua, el vidrio también genera un mayor impacto debido a los procesos involucrados en su obtención, lo que significa que se genera una mayor contaminación en la producción, procesamiento y transporte del vidrio en comparación con el aluminio y el PET. Una de las conclusiones más destacadas de nuestro estudio es que, para los tres materiales analizados, los procesos de obtención del material son la etapa que genera el mayor impacto ambiental. Por lo tanto,

es esencial considerar estrategias de mejora en esta fase para implementar procesos productivos más sostenibles. En resumen, de acuerdo con los resultados obtenidos, concluimos que, en el contexto actual de la producción industrial de envases de bebidas carbonatadas, la botella de PET es la opción más sostenible.

Por otro lado, también es importante mencionar que existen otras variables de impacto ambiental relevantes que no fueron abordadas en esta investigación. Variables como la degradación del suelo y la utilización de recursos no renovables que también impactan en una evaluación integral de la sostenibilidad de los materiales de envasado. Sería beneficioso para futuras investigaciones incorporar estas variables para obtener una visión más completa de los impactos ambientales asociados con los distintos materiales.

REFERENCIAS

1. World Commission on Environment and Development. (1987). Our Common Future, Report. Published as Annex to General Assembly document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment, Agosto 2, 1987.
2. Trama, Luis y Troiano, Juan Carlos (2001) Análisis del ciclo de vida según las normas de la subserie IRAM-ISO 14040, Construir, número 57, enero/febrero, ISBN 987-01-0174-7.
3. E. a. MARI. (2002). La industria del vidrio y el medio ambiente: oportunidad y enfoque del Análisis del Ciclo de Vida. Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio, 41(4), 0366–3175.
4. International Standard Organization. (1997). ISO 14040:1997(E). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
5. Hospido, A., & Rivela, B. (2022). Perspectivas y reflexiones. ResearchGate.
6. ¿Qué es la evaluación de ciclo de vida (LCA)? (s. f.). Solidworks. Recuperado 7 de septiembre de 2022, de https://www.solidworks.es/sustainability/sustainable-design-guide/2995_ESN_HTML.htm
7. Gobierno de México. (2014, 16 de julio). La planta de reciclado PET más grande del mundo. <https://www.gob.mx/epn/articulos/planta-de-pet-reciclado-grado-alimenticio-mas-grande-del-mundo#:~:text=En%20Toluca%2C%20hoy%20inaugur%C3%A9%20la,la%20salud%20de%20los%20mexicanos.>
8. Bravo, C. (Septiembre 2022). Ergonomía y envases de vidrio. De los métodos y las maneras, número 8, ISBN 978-607-28-1326-7.
9. Kalpakjian, S. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología (5a. ed.). México: Pearson Educación.
10. Arroyo Mayorga, Y. (2022). Evaluación de la sustentabilidad de materiales para el envasado de refrescos utilizando solidworks sustainability. [Tesis]. Repositorio Académico Digital, <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/25387>.
11. Brooks, D. W., & Giles, G. A. (Eds.). (2002). PET packaging technology. Sheffield Academic Press.
12. Sánchez, A. (2019, 12 de noviembre). Vidrio, el residuo ‘olvidado’ en el proceso de reciclaje en México. El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/vidrio-el-residuo-olvidado-en-el-proceso-de-reciclaje-en-mexico/>.
13. Cámara De Diputados. (2014). Boletín N°. 3469 En México, 90 millones de botellas de plástico de refrescos y agua son lanzados a la vía pública, ríos y mares. Recuperado 26 de diciembre de 2022, de <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2017/Abril/13/3469-En-Mexico-90-millones-de-botellas-de-plastico-de-refrescos-y-agua-son-lanzados-a-la-via-publica-rios-y-mares.>
14. Manufactura.mx. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, <https://manufactura.mx/industria/2018/04/11/arca-continental-la-fabrica-que-produce-la-famosa-coca-cola-mexicana.>

15. Celis, F. (2018, 15 de enero). La planta más grande de Coca-Cola Femsa está en México. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/asi-es-la-planta-mas-grande-de-coca-cola-femsa-en-mexico/>.
16. KOF. (2021, 17 de mayo). La economía circular de los empaques de Coca-Cola FEMSA. <https://coca-colafemsa.com/noticias/economia-circular-empaques-coca-cola-femsa/>.
17. Solís, A. (2018, 16 de mayo). Arca Continental ya le pisa los talones a Coca-Cola Femsa. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/arca-continental-ya-le-pisa-talones-a-coca-cola-femsa/>.

Aplicación del cálculo fraccionario en el modelado de corrientes transitorias en polímeros

Jesús Gabino Puente-Córdova¹, Karla Louisse Segura-Méndez¹,
Flor Yanhira Rentería-Baltíerrez², Isaac Yair Miranda-Valdez³

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, México

³ Aalto University, Department of Applied Physics, Espoo, Finland

jesus.puentecr@uanl.edu.mx, karla.seguramz@uanl.edu.mx, flor.renteriabltz@uanl.edu.mx,

isaac.mirandavaldez@aalto.fi

RESUMEN

En este artículo se revisan las limitaciones de los modelos matemáticos comúnmente utilizados en la literatura para la descripción general del fenómeno de corrientes transitorias en materiales poliméricos mediante una ley de la potencia o una función exponencial negativa, y se propone la aplicación del cálculo fraccionario. De entre las limitaciones de los enfoques tradicionales destacan su fracaso en la asociación de este comportamiento eléctrico característico con parámetros físicos. Las causas de éstas provienen de la complejidad del comportamiento eléctrico en los polímeros. Dicho fenómeno ocurre a través de la relajación de carga eléctrica en función del tiempo, donde la viscoelasticidad del polímero influye ampliamente en el movimiento de dipolos eléctricos y en la conducción de portadores de carga eléctrica. Típicamente, el fenómeno de corrientes transitorias se describe a través de circuitos RC (resistor-capacitor), donde un resistor y un capacitor representan la habilidad de un polímero de disipar y almacenar carga eléctrica. El modelo matemático aquí construido mediante la aplicación del cálculo fraccionario proporciona una interpretación física a sus parámetros que describen comportamientos complejos en polímeros.

PALABRAS CLAVE

Corrientes transitorias, derivada de Caputo, cálculo fraccionario, Mittag-Leffler, polímero.

ABSTRACT

This article reviews the limitations of the mathematical models commonly used across the literature for the general description of the phenomenon of transient currents in polymeric materials through a power law or a negative exponential function, and proposes the application of fractional calculus. Among the limitations of the traditional approaches stand out their failure in the association of this distinctive electrical behavior with physical parameters. The causes of these stem from the complexity of electrical behavior in polymers. This phenomenon occurs through the relaxation of electric charge as a function of time, where the viscoelasticity of the polymer widely influences the movement of electric dipoles and the conduction of electric charge carriers. Typically, the phenomenon of transient currents is described using RC (resistor-capacitor) circuits, where a resistor and a capacitor represent the ability of a polymer to dissipate and store electrical charge. The mathematical model herein constructed through the application of fractional calculus provides with a physical interpretation of its parameters, which describe complex behaviors in polymers.

KEYWORDS

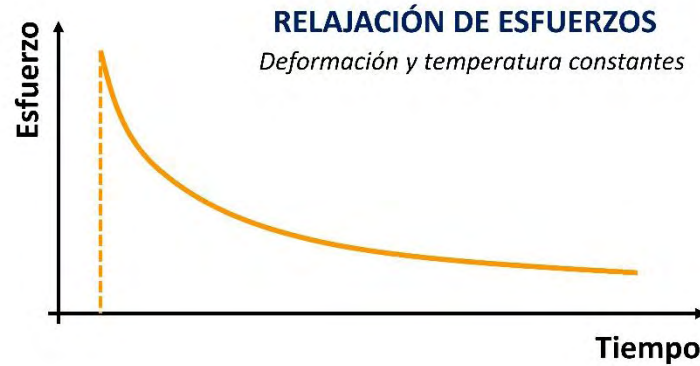
Transient currents, Caputo derivative, fractional calculus, Mittag-Leffler, polymer.

INTRODUCCIÓN

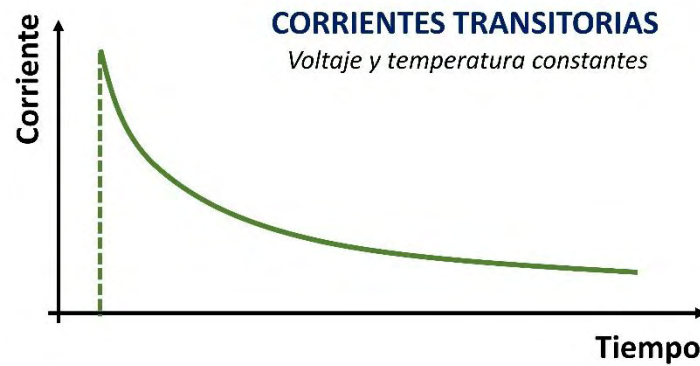
El estudio de las propiedades eléctricas de los polímeros y los mecanismos de transporte y conducción de portadores de carga eléctrica son un tópico de interés para la comunidad científica.¹⁻³ Desde el punto de vista eléctrico, estos materiales cuentan con tres importantes propiedades físicas que los hacen aislantes o dieléctricos: la resistividad ρ , la permitividad relativa ϵ_r y la rigidez dieléctrica. La conductividad eléctrica σ , inversa de la resistividad, se ve restringida por el hecho de que en los polímeros no hay electrones libres, pues ellos están presentes principalmente en los enlaces covalentes que forman las cadenas poliméricas. Respecto a la ϵ_r , algunos materiales poliméricos exhiben una estructura tipo dipolar, donde bajo la acción de un campo eléctrico se orientan y generan un almacenamiento parcial de carga eléctrica. Por su parte, la rigidez dieléctrica se asocia con la capacidad de resistir altos campos eléctricos antes de la ruptura de la estructura interna, lo que generalmente da lugar a la aparición de arborescencias. En virtud de estas propiedades, los materiales poliméricos tienen hoy en día diversas aplicaciones en los sectores de la industria eléctrica y electrónica.⁴⁻⁶

Ahora bien, una manera de abordar los mecanismos de conducción en materiales poliméricos es a través de la medición experimental de corrientes transitorias $I(t)$, es decir, el monitoreo de la evolución de la corriente eléctrica en el tiempo. Esta prueba es análoga al ensayo de relajación de esfuerzos en viscoelasticidad lineal.^{4,7} En la figura 1a se presenta un gráfico correspondiente a un ensayo de relajación de esfuerzos. En este ensayo el polímero se somete a una deformación abrupta y constante (estímulo mecánico) durante un intervalo de tiempo definido y la respuesta que se monitorea es el esfuerzo en función del tiempo. En este gráfico se observa una disminución exponencial del esfuerzo cuando transcurre el tiempo. Dicho comportamiento se debe a las cadenas poliméricas que presentan una tendencia a incrementar su entropía, la cual fue reducida cuando se deformó el material de manera abrupta. Es decir, la disminución del esfuerzo en el tiempo es una manifestación macroscópica del paso de las cadenas poliméricas estiradas o alineadas con una entropía menor, a una conformación en forma de ovillo, donde se tiene un máximo de la entropía.⁸

Un comportamiento análogo se obtiene cuando se aplica un estímulo eléctrico (voltaje) en lugar de un estímulo mecánico (deformación), y ahora la respuesta monitoreada es una corriente eléctrica. La figura 1b presenta una curva típica para un material polimérico, bajo la aplicación de un campo eléctrico constante (equivalente a un voltaje constante). En este caso, la disminución de la corriente eléctrica se debe principalmente a la orientación dipolar del material polimérico; una vez que la corriente ha disminuido considerablemente, se dice que el polímero está polarizado. Debido a la viscoelasticidad del polímero, cuando el voltaje aplicado es suprimido, los dipolos eléctricos orientados previamente regresan de manera parcial a su posición energética inicial, de tal manera que una carga eléctrica se puede almacenar, y la otra se disipa en forma de corriente eléctrica. Por otra parte, si las condiciones se cumplen durante la medición de la corriente eléctrica (tipo de contacto, magnitud del campo eléctrico, temperatura), existe la probabilidad de que se presente la inyección de portadores de carga eléctrica (electrones y huecos) y también su posterior atrapamiento al interior del material. La similitud entre las curvas de las figuras 1a y 1b puede explicarse debido a que corresponden a fenómenos de relajación de propiedades diferentes. Sin embargo, ambos casos son el resultado de una manifestación macroscópica de la viscoelasticidad que presentan los materiales poliméricos.⁹



(a)



(b)

Fig. 1. Curvas típicas para mediciones de (a) relajación de esfuerzos y (b) corrientes transitorias para un material polimérico.

La interpretación de los datos experimentales se lleva a cabo utilizando modelos matemáticos, cuyos parámetros sirven de base para establecer relaciones entre la estructura, las propiedades y la morfología de los materiales poliméricos. Las corrientes transitorias $I(t)$ se componen de dos principales contribuciones: la primera está asociada con la corriente de polarización I_p , la cual depende del número de dipolos eléctricos que se orientan en la dirección del campo eléctrico; la segunda, está asociada a una corriente de conducción I_c , la cual está gobernada por los mecanismos de conducción que se dan a través de la interfaz electrodo-polímero (Schottky o Fowler-Nordheim), o bien, al interior del volumen de material (Poole-Frenkel, Iónico, Dipolar, SCLC).¹⁰ En este sentido, para la corriente de polarización se utiliza la ley de Curie-von Schweidler $I(t) = At^{-p}$, que consiste en una ley de potencia con exponente negativo. El valor del exponente se utiliza como un indicador del mecanismo de dicha corriente. Otra expresión clásica es una función exponencial negativa $\exp(-x)$, la cual resulta al resolver una ecuación diferencial del circuito resistor-capacitor (RC) en serie. Sin embargo, hay reportes en la literatura que ponen en evidencia que el uso de operadores diferenciales de orden entero proporciona desviaciones importantes entre los datos experimentales y las predicciones teóricas. Una alternativa es utilizar operadores de orden fraccionario, es decir, derivadas e integrales de orden no entero.¹¹⁻¹⁴ A esta rama de las matemáticas se le conoce como cálculo fraccionario, o en términos más exactos, método de derivación e integración de orden arbitrario. Diversos trabajos han sido reportados que hacen referencia a la solución de circuitos RC, RL y RLC desde un punto de vista analítico y teórico,¹⁵⁻¹⁸ empleando los conceptos del cálculo

fraccionario. Sin embargo, existen pocos trabajos de investigación donde se ponga en práctica estas herramientas matemáticas.

En este trabajo se propone emplear un modelo matemático en el ámbito del cálculo fraccionario para el análisis de las corrientes transitorias en materiales poliméricos. Se utiliza un operador diferencial de orden no entero bajo la definición de la derivada de Caputo, resolviendo una ecuación diferencial fraccionaria para un circuito RC en serie. La solución se expresa a través de la función Mittag-Leffler, la cual se compara con una ley de potencia, una función exponencial estirada, el modelo empírico de Cross, un modelo exponencial y un modelo generalizado. La validación experimental se lleva a cabo con datos de corriente vs. tiempo bajo condiciones isotérmicas para el polivinil butiral PVB, un termoplástico con aplicación en los sectores automotriz y arquitectónico, y que además funge como matriz orgánica en el desarrollo de materiales híbridos con aplicaciones como sensor y/o actuador.

MODELO FRACCIONARIO DEL CIRCUITO RC

El circuito RC en serie se utiliza como modelo análogo para la interpretación de las propiedades dieléctricas y fenómenos de relajación de diversos sistemas, como células, tejidos, polímeros, aceites, espumas, entre otros.^{16,17,19,20} El resistor se asocia con la disipación de energía en el sistema, mientras que el capacitor se asocia con el almacenamiento de energía. En la figura 2 se muestra un esquema del arreglo en serie para el circuito RC.

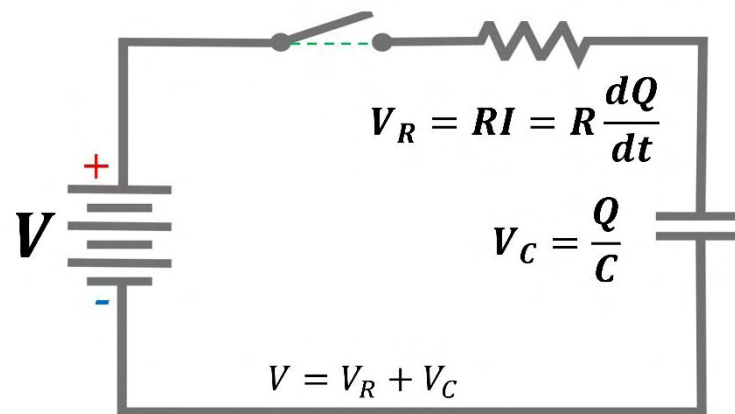


Fig. 2. Circuito RC en serie.

Utilizando las leyes de Kirchhoff y las ecuaciones constitutivas para el resistor y el capacitor, se obtiene una ecuación diferencial lineal, de primer orden y con coeficientes constantes.

$$CD_t^1 V = RC D_t^1 I + D_t^0 I \quad (1)$$

El operador diferencial se representa con $D_t^n f = d^n f / dt^n$, una derivada de orden n de la función f respecto al tiempo t . En la literatura clásica, en las ecuaciones diferenciales lineales se reemplazaban los operadores diferenciales de orden entero por operadores de orden fraccionario. Matemáticamente dicha estrategia es correcta y simple, pero desde el punto de vista dimensional y físico no lo es.^{15,16,18} Un análisis dimensional de los operadores diferenciales de orden entero y fraccionario revela que las unidades son diferentes (ecuación 2).

$$D_t^1 \sim \frac{1}{\tau}, \quad D_t^\alpha \sim \frac{1}{\tau^\alpha}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (2)$$

Donde α es el orden fraccionario y τ es un parámetro que posee unidades de tiempo, cuya función principal es normalizar las unidades para que el sistema sea congruente. Por lo tanto, se establece la ecuación 3:

$$D_t^1 = \tau^{\alpha-1} D_t^\alpha \quad (3)$$

En este trabajo se utiliza un operador diferencial de orden fraccionario bajo la definición de Caputo^{21,22} (ecuación 4).

$${}_0^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t \frac{f'(\xi)}{(t-\xi)^\alpha} d\xi \quad (4)$$

Donde α es el orden fraccionario que toma valores $0 < \alpha \leq 1$, ξ es una variable de integración, $\Gamma(\cdot)$ es la función gamma y f' es la derivada de primer orden. El núcleo de la integral se compone por una función de potencia, la cual es apropiada para el modelado de fenómenos de relajación y procesos con memoria.^{23,24} Esta definición tiene la ventaja de que su transformada de Laplace posee condiciones iniciales que corresponden con lo medido a nivel experimental, razón por la cual se utiliza ampliamente en física e ingeniería. Otro aspecto interesante es que bajo esta definición la derivada de una constante es cero. Esto no ocurre para otros operadores, por ejemplo, el de Riemann-Liouville. Para obtener la ecuación diferencial de orden fraccionario, se sustituyen los operadores de orden entero de la ecuación 1 por lo planteado en la ecuación 3, considerando $0 < \alpha \leq 1$, y un tiempo respuesta $\tau = RC$.

$$C\tau^{\alpha-1} D_t^\alpha V = \tau^\alpha D_t^\alpha I + D_t^0 I \quad (5)$$

Posteriormente, se utiliza la transformada de Laplace $\mathcal{L}\{\cdot\}$ para resolver la ecuación 5:

$$C\tau^{\alpha-1} s^\alpha \mathcal{L}\{V(t)\} = \tau^\alpha s^\alpha \mathcal{L}\{I(t)\} + \mathcal{L}\{I(t)\} \quad (6)$$

Consideramos que el polímero se somete a un escalón de voltaje $V(t) = V_0 u(t)$, donde V_0 es la amplitud del voltaje y $u(t)$ es la función escalón, y además la condición inicial $I(0) = 0$:

$$C\tau^{\alpha-1} s^\alpha \mathcal{L}\{V_0 u(t)\} = \tau^\alpha s^\alpha \mathcal{L}\{I(t)\} + \mathcal{L}\{I(t)\} \quad (7)$$

$$I(s) = \frac{\frac{V_0 C \tau^{\alpha-1}}{\tau^\alpha} \cdot s^{\alpha-1}}{s^\alpha + \frac{1}{\tau^\alpha}} \quad (8)$$

Luego se utiliza la transformada inversa de Laplace $\mathcal{L}^{-1}\{\cdot\}$ para obtener una solución en el dominio del tiempo:

$$\mathcal{L}^{-1}\{I(s)\} = \frac{V_0 C}{\tau} \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{s^{\alpha-1}}{s^\alpha + \frac{1}{\tau^\alpha}} \right\} \quad (9)$$

$$I(t) = \frac{V_0}{R} E_\alpha \left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha \right] \quad (10)$$

Donde $E_\alpha(\cdot)$ es la función Mittag-Leffler (M-L) de un parámetro, que se define mediante una expansión en serie (ecuación 11).

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)} \quad (11)$$

Entonces, la solución analítica para la ecuación 5 resulta en la ecuación 12:

$$I(t) = I_0 \cdot E_\alpha \left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha \right] \quad (12)$$

Cuando $\alpha = 1$, se obtiene la solución clásica para la ecuación diferencial de orden entero (ecuación 1), la cual involucra a la función exponencial (ecuación 13).

$$I(t) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (13)$$

De acuerdo con la naturaleza de las corrientes transitorias, la corriente total se expresa como la suma de la corriente de polarización I_p y la corriente de conducción I_c , $I(t) = I_p + I_c$. En la ecuación 14 se presenta la contribución de I_p denotada por la solución de la ecuación diferencial de orden fraccionario con la función M-L, y la corriente de conducción I_c , que involucra ciertos mecanismos de conducción a través de la interfaz o a través del volumen. I_0 denota una corriente inicial (a tiempos muy cortos), α es el orden fraccionario, y τ corresponde al tiempo respuesta o también conocido como tiempo de relajación.

$$I(t) = I_0 \cdot E_\alpha \left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\alpha \right] + I_c \quad (14)$$

La ecuación anterior se compara con tres funciones empíricas: la función exponencial estirada, la ley de potencia y la función empírica de Cross.²⁵ Se ha reportado que mediante el concepto de la derivada conformable se puede obtener la función exponencial estirada, también conocida como función Kohlrausch-Williams-Watts (KWW).^{16,26} El parámetro β de la ecuación 15 se conoce como exponente estirado, $0 < \beta \leq 1$, con I_0 denotando la corriente inicial.

$$I(t) = I_0 \cdot \exp \left[-\frac{1}{\beta} \left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta \right] + I_c \quad (15)$$

Asimismo, en la literatura se establece que las corrientes transitorias también pueden seguir una función de potencia, que se conoce como ley de Curie-von Schweidler CVS, $I(t) = At^{-p}$, donde A es un parámetro dependiente de la temperatura y p denota un exponente de decaimiento, con $0 < p \leq 1$. En la ecuación 16 se presenta el modelo empleado para el análisis de los datos.

$$I(t) = At^{-p} + I_c \quad (16)$$

Por último, una función empírica que puede ser utilizada para el análisis de las corrientes transitorias es el modelo de Cross, ampliamente empleado en el campo de la reología para el análisis de datos de viscosidad, particularmente en soluciones poliméricas y sustancias con un comportamiento pseudoplástico.²⁵ La ecuación 17 es el modelo propuesto, donde B es un parámetro relacionado con la corriente inicial, λ es una constante de tiempo y m denota un exponente de decaimiento.

$$I(t) = \frac{B}{1 + (\lambda t)^m} + I_c \quad (17)$$

MODELADO TEÓRICO DE CORRIENTES TRANSITORIAS

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se presentan las respuestas teóricas de las ecuaciones 14, 15, 16 y 17, respectivamente, con el objetivo de observar la respuesta que ofrece cada modelo. De manera heurística se seleccionaron los parámetros $I_0=A=B=100$ nA, $I_C=1$ nA y $\tau=1/\lambda=1$ s. Los parámetros α , β , p y m tomaron valores entre 0 y 1.

En la figura 3 se puede observar una disminución de la corriente eléctrica a medida que transcurre el tiempo; también se observa el efecto del orden fraccionario, generando curvas con diferente forma. A tiempos cortos se observa que la corriente inicia en un valor de 100 nA y a medida que transcurre el tiempo la corriente disminuye según el valor del orden fraccionario. Para tiempos menores al tiempo de relajación se observa que el orden fraccionario gobierna de 1 a 0, pero para tiempos mayores al tiempo de relajación el comportamiento se invierte, es decir, hay una disminución de la corriente más pronunciada, la cual se da para un orden fraccionario de 1 y a medida que disminuye el orden fraccionario la corriente disminuye de forma más lenta. Cuando el orden fraccionario es igual a 1 se recupera la solución clásica de la función exponencial.

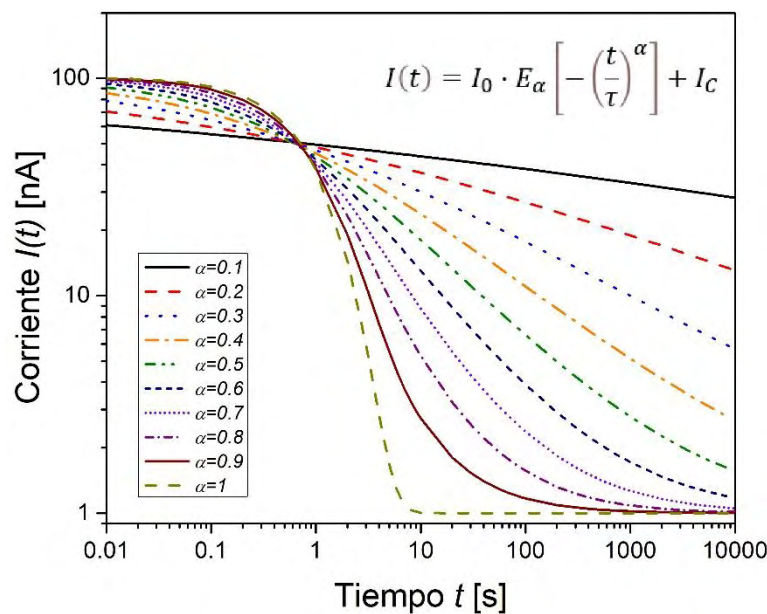


Fig. 3. Respuesta teórica para corriente transitoria con función Mittag-Leffler.

Por su parte, en la figura 4 se presenta la respuesta teórica para el modelo KWW, donde también se observa una disminución de la corriente a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, el efecto del parámetro β es distinto a lo observado en la figura 3. Esto se debe a que la función evaluada es una función exponencial cuyo argumento es una ley de potencia. También cuando el parámetro $\beta = 1$ se recupera la solución clásica de la función exponencial.

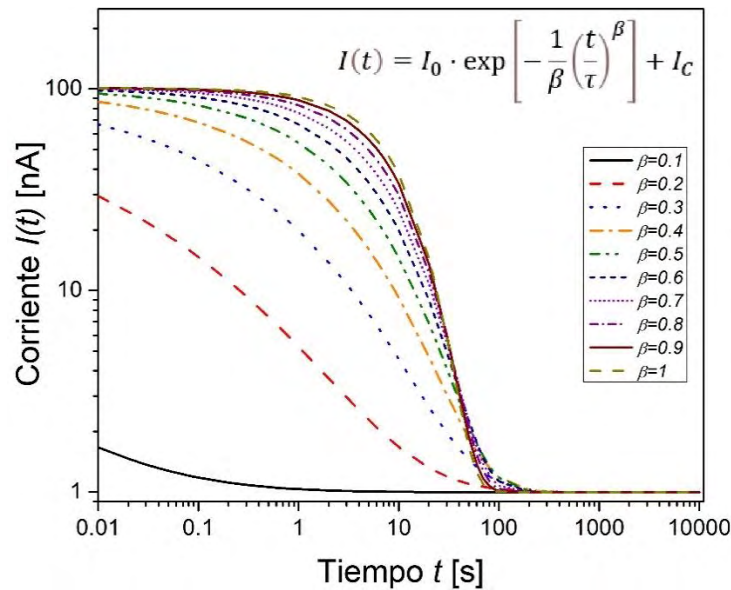


Fig. 4. Respuesta teórica para corriente transitoria con función KWW.

En la figura 5 se muestra la respuesta que ofrece el modelo de ley de potencia CVS, donde se observa que la corriente disminuye a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, la forma de las curvas sí se aleja de lo observado a nivel experimental.^{3,4} Para este caso las curvas se cruzan para un $t = 1$, lo cual se debe a la forma de la función matemática.

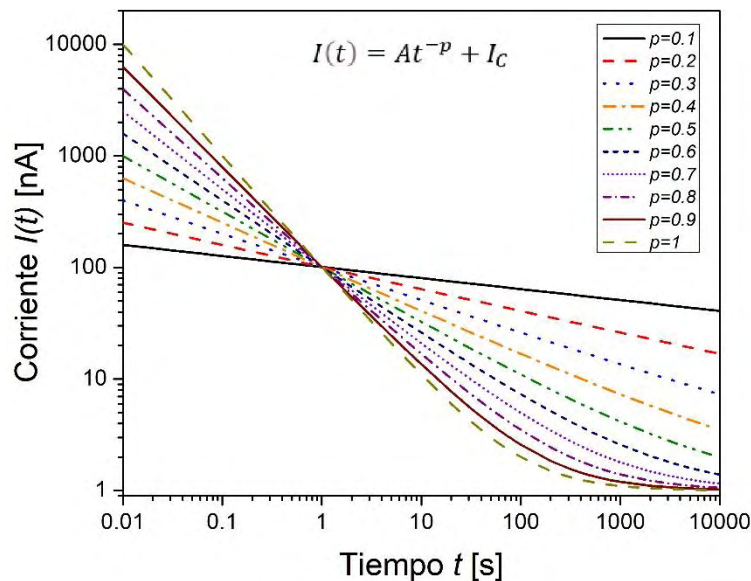


Fig. 5. Respuesta teórica para corriente transitoria con función de potencia.

La respuesta teórica que ofrece el modelo empírico de Cross se presenta en la figura 6. En esta figura se observa una respuesta similar a lo que ofrece el modelo de M-L. Si se toma el resto de los parámetros como fijos, la variación del valor del exponente m da como resultado curvas que podrían ajustarse a los datos experimentales de corrientes transitorias. En la literatura es práctica común tomar modelos o funciones que se utilizan para representar o analizar datos de cierto tipo, por ejemplo, mecánicos, eléctricos u ópticos, y emplearlos de forma análoga para el estudio de ciertos fenómenos cuyas curvas experimentales son similares.^{27,28}

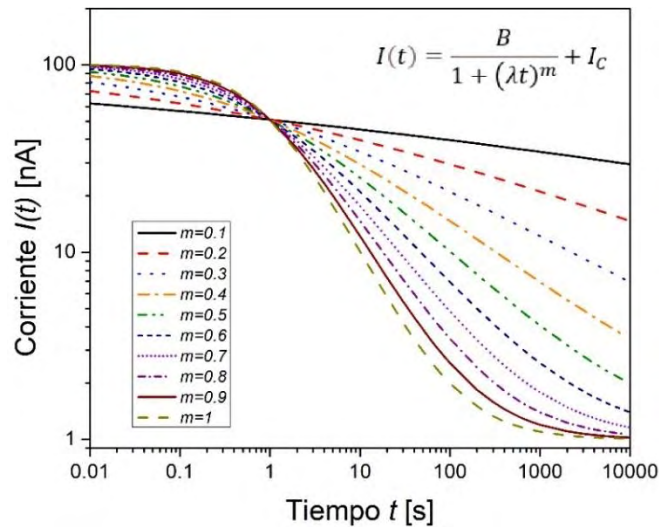


Fig. 6. Respuesta teórica para corriente transitoria con modelo de Cross.

COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y PREDICCIONES TEÓRICAS

En este apartado se presenta la comparativa de datos experimentales de las corrientes transitorias obtenidas para una película de polivinil butiral PVB con un espesor de 100 μm . Ésta fue sometida a un voltaje constante en corriente directa de 150 V (campo eléctrico constante) durante un intervalo de 1000 s y a temperatura constante. Bajo este escenario, se registró la corriente eléctrica con un electrómetro Keithley 6517B utilizando una configuración tipo platos paralelos.^{7,14}

En la figura 7 se presenta la comparación entre los datos experimentales y los modelos presentados en la sección anterior. El ajuste de los modelos a los datos se realiza con paquetes comerciales, por ejemplo, Matlab, Origin o Excel. En las figuras 7a, 7b y 7d se puede observar que los modelos de M-L, KWW y Cross se ajustan a los datos de corriente vs. tiempo. Respecto al modelo de ley de potencia (figura 7c), se observa una desviación importante a tiempos cortos. También se ha colocado como referencia el ajuste a la solución clásica que utiliza la función exponencial (figura 7e), donde se aprecia que no sigue la forma de la curva experimental.

Por otro lado, una estrategia ampliamente utilizada consiste en desarrollar modelos generalizados donde se colocan circuitos RC en serie o paralelo, lo cual da mejores resultados, pero trae en consecuencia un número muy grande de parámetros con una interpretación física muy compleja o nula.^{15,18} En la figura 7f se presenta la comparación empleando un modelo generalizado con 3 elementos RC en paralelo ($N = 3$), dando lugar a un ajuste adecuado a los datos. Al tomar como referencia el valor del coeficiente de correlación R^2 como un indicador del ajuste o representación de los datos experimentales, se puede considerar que aquellos que presentan un R^2 mayor a 0.9 pueden tomarse como aceptables. Entonces, se puede considerar que los modelos M-L, KWW y Cross son apropiados para los datos experimentales presentados en este trabajo.

Un hecho interesante es que la función Mittag-Leffler presenta dos aproximaciones asintóticas, a tiempos cortos ($t \rightarrow 0$), $E_\alpha(-z^\alpha) \sim \exp[-z^\alpha/\Gamma(1+\alpha)]$, y a tiempos largos ($t \rightarrow \infty$), $E_\alpha(-z^\alpha) \sim z^{-\alpha}/\Gamma(1-\alpha)$. Esto significa que $E_\alpha(\cdot)$ interpola entre la función exponencial estirada KWW y una ley de potencia CVS.²⁹

Respecto al orden fraccionario $\alpha = 0.686$ (figura 7a), el valor obtenido puede interpretarse como una medida de la tasa de disipación de energía en el material polimérico.^{13,14,16} Para β y m , también se obtuvieron valores entre 0 y 1, aunque es difícil darles una interpretación física. El orden fraccionario en las ecuaciones diferenciales de orden no entero da como resultado un grado adicional de libertad que permite el análisis de sistemas complejos y no lineales, que en comparación con modelos clásicos o generalizados produce un mejor ajuste y descripción de las curvas experimentales con una menor cantidad de parámetros.

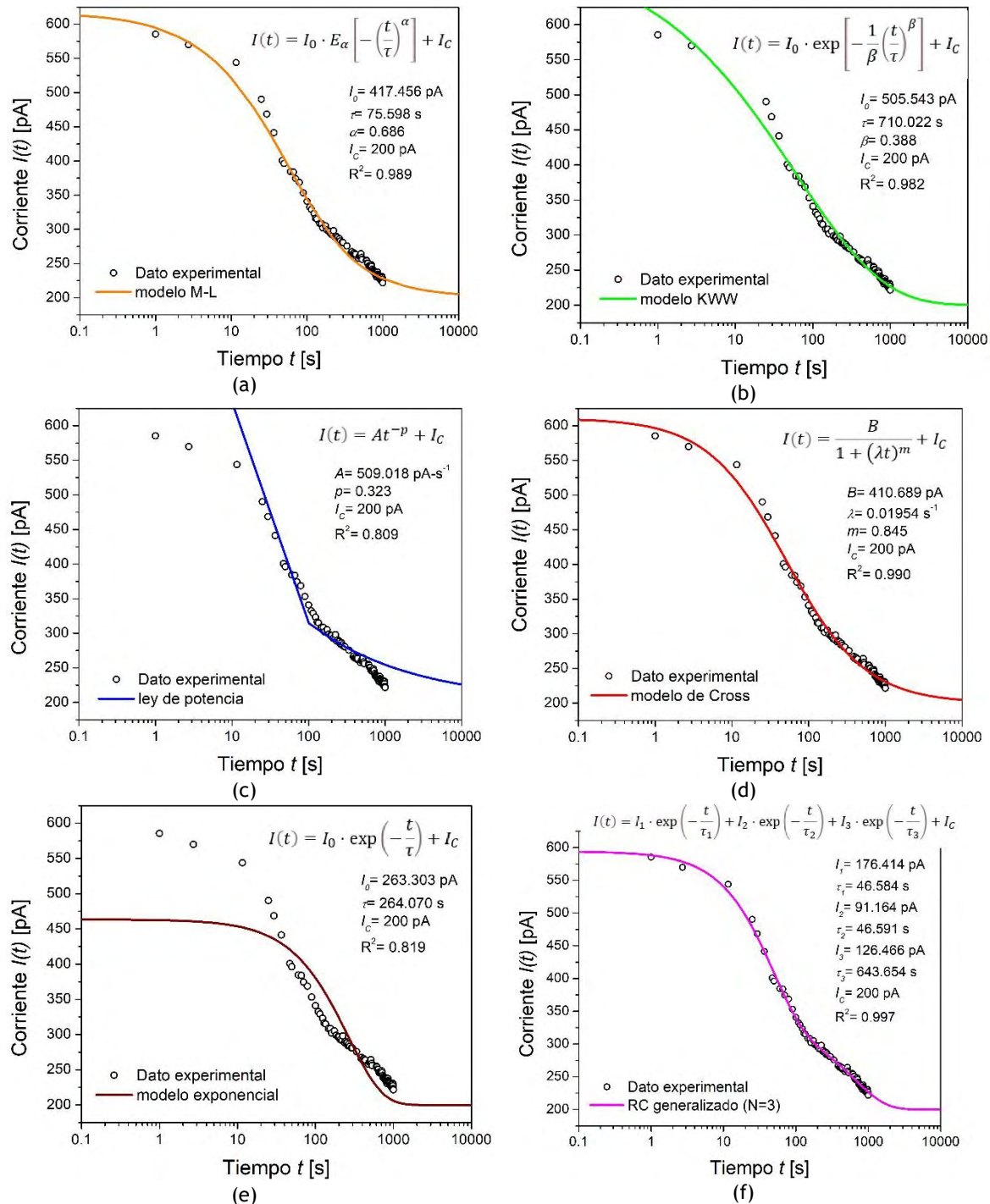


Fig. 7. Comparación entre datos experimentales y modelos: (a) modelo de M-L, (b) modelo KWW, (c) ley de potencia, (d) modelo de Cross, (e) modelo exponencial y (f) modelo generalizado. En las gráficas se presentan los valores obtenidos para los parámetros de cada modelo.

CONCLUSIONES

Las curvas experimentales de las corrientes transitorias, una manifestación eléctrica, son análogas a las curvas de relajación de esfuerzos, una manifestación mecánica. El uso de modelos empíricos es una práctica común para la interpretación de datos experimentales, pero dan como resultado parámetros cuya interpretación está alejada de un sentido físico. En este trabajo se planteó el uso del

cálculo fraccionario como estrategia matemática para el modelado de las corrientes transitorias, donde el orden fraccionario se relacionó con la tasa de disipación de energía en un material polimérico. También se propuso el uso del modelo empírico de Cross, el cual se ajustó a lo observado a nivel experimental. La selección del modelo a utilizar dependerá del nivel de precisión que se busca, y del costo computacional que esto conlleva. La metodología propuesta puede ser empleada para el análisis de corrientes transitorias en materiales poliméricos, nanocompuestos, aislantes, dieléctricos y otros sistemas similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la FIME de la UANL por el apoyo brindado durante esta investigación.

REFERENCIAS

1. C. Guillermin, P. Rain, S.W. Rowe, Transient and steady-state currents in epoxy resin, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 39 (2006) 515–524. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/3/015>.
2. H.F.M. Mohamed, E.E. Abdel-Hady, W.M. Mohammed, Investigation of Transport Mechanism and Nanostructure of Nylon-6,6/PVA Blend Polymers, *Polymers (Basel)*. 15 (2022) 107. <https://doi.org/10.3390/polym15010107>.
3. F. Namouchi, H. Guermazi, P. Notingher, S. Agnel, Effect of space charges on the local field and mechanisms of conduction in aged PMMA, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 13 (2010) 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/13/1/012006>.
4. S. Morsalin, B.T. Phung, Dielectric response study of service-aged XLPE cable based on polarisation and depolarisation current method, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 27 (2020) 58–66. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008306>.
5. C. Laurent, G. Teyssedre, S. Le Roy, F. Baudoin, Charge dynamics and its energetic features in polymeric materials, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 20 (2013) 357–381. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6508737>.
6. C. Mouchache, N. Saidi-Amroun, V. Griseri, M. Saidi, G. Teyssedre, Electrical Conduction and Space Charge in Gamma-Irradiated XLPE, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 30 (2023) 2099–2106. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3271612>.
7. J.G. Puente-Córdova, E. Reyes-Melo, B. López-Walle, Estudio de los mecanismos de conducción eléctrica en películas delgadas de PVB, *Ingenierías* 20 (2017) 55–72. https://ingenierias.uanl.mx/anteriores/76/documentos/A20_N76_estudio_de_los_mecanismos.pdf.
8. S. Matsuoka, Entropy, free volume, and cooperative relaxation, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 102 (1997) 213. <https://doi.org/10.6028/jres.102.017>.
9. B. Hadri, P.R. Mamy, J. Martinez, M. Mostefa, Electrical conduction in a semicrystalline polyethylene terephthalate in high electric field, *Solid State Commun.* 139 (2006) 35–39. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2006.04.034>.
10. F.-C. Chiu, A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014 (2014) 1–18. <https://doi.org/10.1155/2014/578168>.
11. P.A. Ryapolov, E.B. Postnikov, Mittag-Leffler Function as an Approximant to the Concentrated Ferrofluid's Magnetization Curve, *Fractal Fract.* 5 (2021) 147. <https://doi.org/10.3390/fractalfract5040147>.
12. I.Y. Miranda-Valdez, J.G. Puente-Córdova, F.Y. Rentería-Baltíerrez, L. Fliri, M. Hummel, A. Puisto, J. Koivisto, M.J. Alava, Viscoelastic phenomena in methylcellulose aqueous systems: Application of fractional calculus, *Food Hydrocoll.* 147 (2024) 109334. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109334>.
13. F.Y. Rentería-Baltíerrez, M.E. Reyes-Melo, J.G. Puente-Córdova, B. López-Walle, Application of fractional calculus in the mechanical and dielectric correlation model of hybrid

- polymer films with different average molecular weight matrices, *Polym. Bull.* 80 (2023) 6327–6347. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04365-1>.
14. F.Y. Rentería-Baltierra, M.E. Reyes-Melo, J.G. Puente-Córdoba, B. López-Walle, Correlation between the mechanical and dielectric responses in polymer films by a fractional calculus approach, *J. Appl. Polym. Sci.* 138 (2021). <https://doi.org/10.1002/app.49853>.
15. E. Zambrano-Serrano, M.A. Platas-Garza, A.E. Loya-Cabrera, G.E. Cedillo-Garza, C. Posadas-Castillo, Comportamiento de orden fraccionario en la respuesta de un circuito RC mediante derivada de núcleo singular, *Ingenierías* 24 (2021) 22–32. <https://doi.org/10.29105/ingenierias24.91-19>.
16. J.G. Puente-Córdoba, F.Y. Rentería-Baltierra, M.E. Reyes-Melo, La derivada conformable y sus aplicaciones en ingeniería, *Ingenierías* 23 (2020) 20–31. <https://doi.org/10.29105/ingenierias23.88-3>.
17. J.F. Gómez-Aguilar, J. Rosales-García, M. Guía-Calderón, J.R. Razo-Hernández, Fractional RC and LC Electrical Circuits, *Ing. Investig. y Tecnol.* 15 (2014) 311–319. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)72219-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)72219-x).
18. J.F. Gómez-Aguilar, A. Atangana, V.F. Morales-Delgado, Electrical circuits RC, LC, and RL described by Atangana–Baleanu fractional derivatives, *Int. J. Circuit Theory Appl.* 45 (2017) 1514–1533. <https://doi.org/10.1002/cta.2348>.
19. F. Gómez-Aguilar, J. Rosales-García, M. Guía-Calderón, J. Bernal-Alvarado, Analysis of Equivalent Circuits for Cells: A Fractional Calculus Approach, *Ing. Investig. y Tecnol.* 13 (2012) 375–384. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n3.035>.
20. K. Bandara, C. Ekanayake, T. Saha, Modelling the dielectric response measurements of transformer oil, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 22 (2015) 1283–1291. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.7076832>.
21. M.D. Ortigueira, J.A. Tenreiro Machado, What is a fractional derivative?, *J. Comput. Phys.* 293 (2015) 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2014.07.019>.
22. G. Sales Teodoro, J.A. Tenreiro Machado, E. Capelas de Oliveira, A review of definitions of fractional derivatives and other operators, *J. Comput. Phys.* 388 (2019) 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.03.008>.
23. A. Bonfanti, J.L. Kaplan, G. Charras, A. Kabla, Fractional viscoelastic models for power-law materials, *Soft Matter* 16 (2020) 6002–6020. <https://doi.org/10.1039/D0SM00354A>.
24. A. Atangana, J.F. Gómez-Aguilar, Decolonisation of fractional calculus rules: Breaking commutativity and associativity to capture more natural phenomena, *Eur. Phys. J. Plus* 133 (2018) 166. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-12021-3>.
25. J.G. Puente Córdoba, C.L. Hernández Ramírez, M.E. Reyes Melo, F.Y. Rentería Baltierra, I.Y. Miranda Valdez, Estudio reológico de soluciones poliméricas de carboximetil celulosa, *Ing. Investig. y Tecnol.* 23 (2022) 1–10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.012>.
26. J. Rosales-García, J.A. Andrade-Lucio, O. Shulika, Conformable derivative applied to experimental Newton’s law of cooling, *Rev. Mex. Física* 66 (2020) 224–227. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.66.224>.
27. Y. Zhao, P. Chen, D. Cao, Extension of Modified Havriliak-Negami Model to Characterize Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Binders, *J. Mater. Civ. Eng.* 28 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001491](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001491).
28. N. Zeggai, B. Dali Youcef, F. Dubois, T. Bouchaour, P. Supiot, L. Bedjaoui, U. Maschke, Analysis of dynamic mechanical properties of photochemically crosslinked poly(isobornylacrylate-co-isobutylacrylate) applying WLF and Havriliak-Negami models, *Polym. Test.* 72 (2018) 432–438. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.038>.
29. F. Mainardi, Why the Mittag-Leffler Function Can Be Considered the Queen Function of the Fractional Calculus?, *Entropy* 22 (2020) 1359. <https://doi.org/10.3390/e22121359>.

Estudio comparativo de módulos de rigidez de tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas

Javier Ramón Sotomayor Castellanos

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México
javier.sotomayor@umich.mx

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar las densidades y los módulos de rigidez en tres maderas japonesas y tres maderas mexicanas. La unidad experimental consistió en 210 especímenes agrupados en muestras de treinta y cinco probetas de cada una de las seis especies. Se determinaron el contenido de humedad y la densidad, y se midieron las frecuencias naturales de vibración en pruebas de torsión dinámica. Las magnitudes de los módulos de rigidez son comparables con los de investigaciones anteriores. Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas entre las densidades y los módulos de rigidez de las seis especies.

PALABRAS CLAVE

Contenido de humedad, densidad de la madera, resistencia mecánica, torsión dinámica.

ABSTRACT

The objective of the investigation was to determine the densities and stiffness modules in three Japanese woods and three Mexican woods. The experimental unit consisted of 210 specimens grouped in samples of thirty-five specimens of each of the six species. Moisture content and density were determined, and natural vibration frequencies were measured in dynamic torsion tests. The magnitudes of the modules of rigidity are comparable with those of previous investigations. However, there are statistically significant differences between the densities and modules of rigidity of the six species.

KEYWORDS

Moisture content, wood density, mechanical strength, dynamic torsion.

INTRODUCCIÓN

El módulo de rigidez expresa la capacidad para las pequeñas deformaciones angulares de una pieza de madera, cuando son provocadas por solicitaciones desalineadas, de tal forma que su rigidez explica la capacidad de deformación entre dos direcciones anisotrópicas de la madera. Este parámetro es útil para el cálculo de elementos y conexiones donde aparecen deformaciones fuera de plano, ocasionadas por esfuerzos cortantes; por ejemplo, en vigas que trabajan en flexión y en torsión, así como en conexiones entre elementos estructurales en edificaciones y en artículos de madera. En el mismo contexto, el aserrío de madera produce usualmente paralelepípedos para uso estructural, recortados en el plano radial-tangencial con al menos dos de sus caras mostrando planos longitudinales-tangenciales. De esta forma, cuando la madera está en servicio, trabaja como viga en flexión o como elemento resistente en productos compuestos de madera. El módulo de rigidez para el plano longitudinal-tangencial es el parámetro requerido para el diseño y cálculo de productos y estructuras de madera.¹

Una de las tendencias contemporáneas en investigación en ciencias y tecnología de la madera es caracterizar el comportamiento mecánico de una especie en particular para sugerir su utilización en productos específicos de valor agregado. En este contexto, existen pocos estudios comparativos entre grupos de maderas de diferentes orígenes geográficos. La literatura sobre el tema de investigación es limitada cuanto al número de trabajos publicados recientemente. La tabla I presenta una selección de datos recolectados en la literatura de especies en orden alfabético con sus densidades y módulos de rigidez para el periodo comprendido entre 2003 y 2018.

Tabla I. Datos de la literatura sobre densidades y módulos de rigidez en diferentes especies de madera.

No.	Especies	ρ_{CH} (kg m ⁻³)	G_{LT} (MN m ⁻²)	Referencias
1	<i>Abies balsamea</i>	393	575	Hernández y Sotomayor (2014) ²
2	<i>Acosmium panamense</i>	1005	1622	Sotomayor (2018) ³
3	<i>Albizia plurijuga</i>	844	1792	Sotomayor (2018) ³
4	<i>Andira inermis</i>	716	1084	Sotomayor (2018) ³
5	<i>Cryptomeria japonica</i>	360	784	Anshari <i>et al.</i> (2011) ⁴
6	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	1511	Sotomayor (2018) ³
7	<i>Cordia elaeagnoides</i>	1135	2157	Sotomayor (2016) ⁵
8	<i>Fagus crenata</i>	740	637	Naruse (2003) ⁶
9	<i>Fagus sylvatica</i>	689	1010	Ozyhar <i>et al.</i> (2013) ⁷
10	<i>Hevea brasiliensis</i>	605	1008	Nadir <i>et al.</i> (2014) ⁸
11	<i>Juglans pyriformis</i>	810	1369	Sotomayor (2018) ³
12	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	716	1328	Sotomayor (2016) ⁵
13	<i>Pinus pseudostrobus</i>	540	922	Sotomayor (2015) ⁹
14	<i>Paulownia tomentosa</i>	300	703	Komán y Feher (2017) ¹⁰
15	<i>Picea abies</i>	465	863	Kránitz <i>et al.</i> (2014) ¹¹
16	<i>Picea sitchensis</i>	390	720	Wang <i>et al.</i> (2018) ¹
17	<i>Picea sitchensis</i>	400	400	Yoshihara (2012) ¹²
18	<i>Picea abies</i>	472	744	Olsson y Källsner (2013) ¹³
19	<i>Pinus densiflora</i>	510	981	Cha (2015) ¹⁴
20	<i>Pinus sylvestris</i>	398	755	Roohnia y Kohantorabi (2015) ¹⁵
21	<i>Psidium sartorianum</i>	789	1067	Sotomayor (2018) ³
22	<i>Quercus scytophylla</i>	933	1294	Sotomayor (2015) ⁹
23	<i>Tabebuia rosea</i>	592	879	Sotomayor (2016) ⁵
24	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	2320	Sotomayor (2018) ³
25	<i>Taxus baccata</i>	650	1650	Keunecke <i>et al.</i> (2007) ¹⁶
26	<i>Thuja plicata</i>	353	320	Sotomayor y Villaseñor (2016) ¹⁷

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez.

Los autores referidos en la tabla I emplean diferentes estrategias para determinar los módulos de rigidez en el plano longitudinal-tangencial (G_{LT}). Entre los métodos utilizados se pueden mencionar: las frecuencias de vibraciones torsionales en placas de madera posicionadas como vigas en voladizo;¹ los ensayos de compresión estática;² la utilización de vibraciones transversales;³ ensayos de compresión estática con diferentes contenidos de humedad de la madera;⁴ el estudio de placas de madera con frecuencias derivadas de vibraciones torsionales;^{5,15} pruebas de flexión estática con cuatro puntos, complementadas con métodos numéricos;⁶ uso de ultrasonido;⁷ pruebas de cortante estática;⁸ valores de módulos G_{TL} estimados a partir de modelos teóricos;⁹ pruebas de cortante estática;¹⁰ utilización de ultrasonido;^{11,16} empleo de placas de madera deformadas en torsión estática;¹² combinación de pruebas de flexión estática y dinámica con el método del elemento finito;¹³ ondas de esfuerzo;¹⁴ estudio de placas de madera con vibraciones torsionales en el plano tangencial- longitudinal.¹⁷ A manera de síntesis, en los trabajos citados se registra variabilidad en los resultados según la especie en estudio, así como la técnica empleada para la determinación de los módulos de rigidez. Además, se observa que sus magnitudes aumentan proporcionalmente a la densidad de las maderas.

Como hipótesis de trabajo, la investigación plantea que las magnitudes de los módulos de rigidez de tres maderas japonesas (*Paulownia tomentosa*, *Cryptomeria japonica* y *Fagus crenata*), así como de tres maderas mexicanas (*Pinus pseudostrobus*, *Tabebuia rosea* y *Quercus scytophylla*), son del mismo orden que las reportadas en la bibliografía. Para verificar esta hipótesis, el objetivo de la investigación fue determinar y comparar sus densidades y sus módulos de rigidez determinados experimentalmente con pruebas de torsión dinámica.

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se adquirieron probetas de madera de *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata* en el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón. Igualmente, se prepararon probetas de *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla* en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia, México.

Las dimensiones de las probetas fueron 0.01 m de espesor por 0.15 m de ancho y 0.15 m de largo, alineadas de tal forma que las aristas correspondieron a las direcciones radial, tangencial y longitudinal del plano leñoso. Las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento a una temperatura de 20°C (± 2°C) y a una humedad relativa del aire de 65 % (± 5 %), hasta que la madera alcanzó su contenido de humedad en equilibrio de 11 %.

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó mediante la relación entre el peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014.¹⁸ La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad, se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen de ésta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014.¹⁹

Las pruebas de vibración en torsión adaptaron el protocolo recomendado por la norma ASTM C1259-14²⁰ y siguen el procedimiento descrito en Sotomayor³ y Sotomayor y Villaseñor.¹⁷ La probeta se posicionó sobre soportes aislantes en medio del ancho (b) y del largo (l) de las probetas, formando una cruz. La probeta fue solicitada en la dirección radial, perpendicularmente a la dirección longitudinal en el plano tangencial-radial, lo cual ocasionó vibraciones en torsión en el plano correspondiente a las direcciones longitudinal y tangencial, de tal forma que el módulo de rigidez calculado corresponde al plano longitudinal-tangencial.

En conformidad con la norma ASTM E1876-15,²¹ en cada una de las 35 probetas de cada especie, se produjo un impacto empleando una esfera de acero de 0.005 m de diámetro, adherida a un cabo elástico de 0.01 m de longitud y de 0.002 m de espesor por 0.007 m de ancho. El impacto fue ejecutado en el punto P de la superficie de la probeta, localizado en la intersección de 0.25 del ancho (b) y a 0.25 del largo (l) de cada espécimen (figura 1). Mediante el empleo de un aparato Grindosonic® modelo MKS, se registró el movimiento de la probeta en el punto (s), en una posición simétrica respecto al punto de impacto. La lectura del sensor piezo-eléctrico de movimiento se transforma en una señal eléctrica, la cual, a su vez, es convertida en la frecuencia natural (f) del sistema, con una precisión de lectura de 0.005 %. La frecuencia y el módulo de rigidez dinámico son rubricados con el subíndice “LT” para identificarlos como derivados de pruebas de torsión en el plano longitudinal-tangencial de la madera.

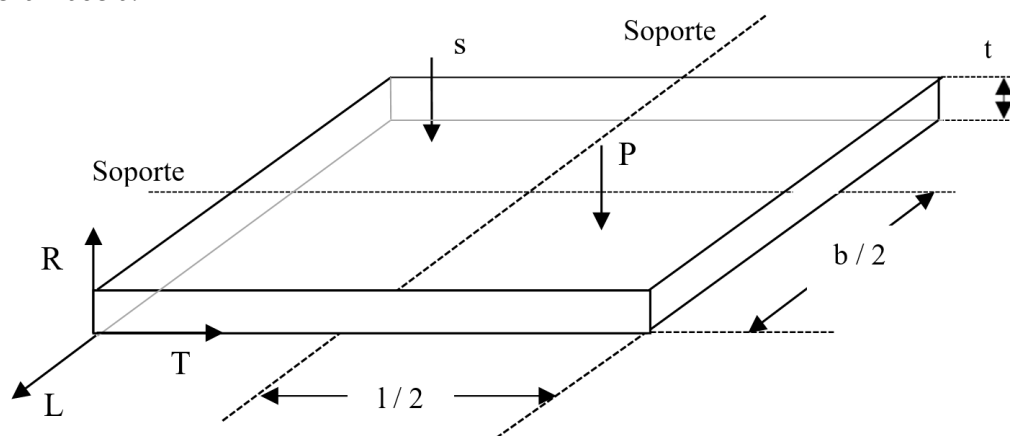


Fig. 1. Diagrama de las pruebas de vibraciones en torsión. P: posición para ejecutar el impacto; s: posición para medir la frecuencia natural; R: dirección radial (t: espesor); T: dirección tangencial (l: largo); L: dirección longitudinal (b: ancho). Adaptado de la norma ASTM C1259-15.²⁰

El módulo de rigidez dinámico de la madera por vibraciones en torsión se calculó con la fórmula (1)²¹:

$$G_{LT} = \frac{4 l m f_{LT}^2}{b t} \left(\frac{B}{(1+A)} \right) \quad (1)$$

con

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4\left(\frac{t}{b}\right) - 2.52\left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0.21\left(\frac{t}{b}\right)^6}$$

$$A = \frac{0.5062 - 0.8776\left(\frac{b}{t}\right) + 0.3504\left(\frac{b}{t}\right)^2 - 0.0078\left(\frac{b}{t}\right)^3}{12.03\left(\frac{b}{t}\right) + 9.892\left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

Donde:

G_{LT} = Módulo de rigidez dinámico (N m⁻²)

f_{LT} = Frecuencia natural (Hz)

m = masa de la probeta (g)

l = Largo de la probeta (Dirección tangencial) (m)

t = Espesor de la probeta (Dirección radial) (m)

b = Ancho de la probeta (Dirección longitudinal) (m)

A y B = Factores de ajuste geométrico

DISEÑO EXPERIMENTAL

La unidad experimental consistió en 210 especímenes agrupados en muestras de 35 probetas de cada una de las seis especies en estudio. Las variables de respuesta fueron la densidad y el módulo de rigidez. Se calcularon las medidas estadísticas de media (μ), desviación estándar (σ) y coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Asimismo, se realizaron pruebas de normalidad de las muestras. Los criterios de demarcación para aceptar una distribución normal fueron valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]

Se realizaron pruebas de hipótesis de verificación de varianza (Ver-var) y de análisis de varianza (Anova) para un nivel de confianza de 95 %. El criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente significativa fue los valores de $P_{(\alpha = 0.05)} < 0.05$. Se realizaron pruebas de rangos múltiples. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y sus coeficientes de determinación (R^2) entre los módulos de rigidez (G_{LT}) y las densidades (ρ_{CH}) para datos de esta investigación y de la literatura revisada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla II presenta las densidades y módulos de rigidez de tres maderas japonesas: *P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*, así como de tres maderas mexicanas: *P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*. La tabla III presenta los resultados, en las distribuciones de las muestras, de las pruebas estadísticas de normalidad, de verificación y análisis de varianza, así como de las pruebas de rangos múltiples.

Tabla II. Densidades y módulos de rigidez.

		ρ_{CH} (kg m ⁻³)	G_{LT} (MN m ⁻²)
Especies mexicanas			
<i>Pinus pseudostrobus</i>	μ	620	1141
	σ	105	281
<i>Tabebuia rosea</i>	μ	776	1563
	σ	81	299
<i>Quercus scytophylla</i>	μ	976	1204
	σ	30	96
Especies japonesas			
<i>Paulownia tomentosa</i>	μ	266	456
	σ	21	96
<i>Cryptomeria japonica</i>	μ	421	742
	σ	22	101
<i>Fagus crenata</i>	μ	629	1056
	σ	16	100

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; μ = Media; σ = Desviación estándar.

Tabla III. Resultados de las pruebas estadísticas.

Especies	Normalidad	SE	AE	Ver-var	Anova
			P_{CH}	$P_{(\alpha = 0.5)}$	$P_{(\alpha = 0.5)}$
<i>Pinus pseudostrobus</i>		-0.269	-0.803	<0.001	<0.001
<i>Tabebuia rosea</i>		-0.693	-0.895	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>		-1.752	0.577	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>		1.657	-0.456	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>		0.184	-1.003	-	-
<i>Fagus crenata</i>		-0.337	-0.458	-	-
			G_{LT}		
<i>Pinus pseudostrobus</i>		0.769	-0.418	<0.001	<0.001
<i>Tabebuia rosea</i>		0.250	-0.884	-	-
<i>Quercus scytophylla</i>		1.351	0.743	-	-
<i>Paulownia tomentosa</i>		1.519	-0.925	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>		1.776	0.527	-	-
<i>Fagus crenata</i>		0.289	-0.537	-	-
Grupos Homogéneos ρ_{CH}					
<i>Paulownia tomentosa</i>	X	-	-	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	X	-	-	-
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	X	-	-
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X	-	-
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	X	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	-	X
G_{LT}					
<i>Paulownia tomentosa</i>	X	-	-	-	-
<i>Cryptomeria japonica</i>	-	X	-	-	-
<i>Fagus crenata</i>	-	-	X	-	-
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-	-	X	X	-
<i>Quercus scytophylla</i>	-	-	-	X	-
<i>Tabebuia rosea</i>	-	-	-	-	X

ρ_{CH} = Densidad; G_{LT} = Módulo de rigidez; SE = Sesgo estandarizado; AE = Apuntamiento estandarizado; Ver-var = Verificación de varianza; Anova = Análisis de varianza; No existen diferencias estadísticamente significativas entre especies que comparten una misma columna de X.

Las pruebas de normalidad de las densidades y de los módulos de rigidez para las seis maderas indican que las distribuciones de sus muestras son normales (tabla III). Este resultado sugiere que las mediciones fueron uniformes. Por su parte, las pruebas de hipótesis advierten que existen diferencias estadísticamente significativas entre densidades y entre módulos de rigidez. En cambio, las pruebas de rangos múltiples específicamente muestran que no existen diferencias significativas entre las densidades de *P. pseudostrobus* y *F. crenata*. Para el caso de los módulos de rigidez, estas pruebas muestran que no existen diferencias significativas entre los de *F. crenata* y *P. pseudostrobus*, ni entre los de *P. pseudostrobus* y *Q. scytophylla*.

DENSIDADES

Las densidades observadas se sitúan en el intervalo de 266 kg m⁻³ para *P. tomentosa* hasta 976 kg m⁻³ para *Q. scytophylla* (tabla I). Los valores son similares a los reportados en la bibliografía para las maderas japonesas^{6,22-26} y para las maderas mexicanas.^{9, 27, 28} Las densidades de *F. crenata* y de *P. pseudostrobus* son similares; esta última es solamente 2 % mayor. Los coeficientes de variación para las seis especies fluctúan entre 3 % y 17 % y son semejantes a los reportados en la bibliografía para estas especies (figura 2).

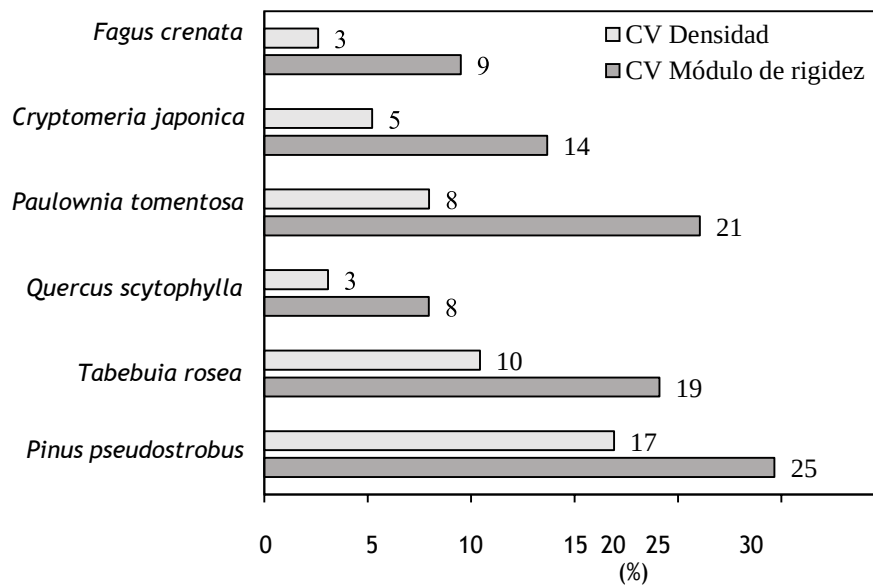


Fig. 2. Comparativo de los coeficientes de variación (CV).

MÓDULOS DE RIGIDEZ

Los módulos de rigidez de las maderas estudiadas en esta investigación son comparables con los de investigaciones anteriores (tabla I). Las magnitudes se sitúan en el intervalo que abarca desde un mínimo de 456 MN m^{-2} para *P. tomentosa* hasta un máximo de 1563 MN m^{-2} para *T. rosea* (tabla II). Sus coeficientes de variación oscilan desde 5 % en *C. japonica* hasta 25 % en *P. pseudostrobus* (figura 2).

Respecto a las maderas mexicanas, para *P. pseudostrobus* Sotomayor⁹ reporta un módulo de rigidez de $G_{LT} = 922 \text{ MN m}^{-2}$ correspondiente a una densidad $\rho_{CH} = 540 \text{ kg m}^{-3}$; para *T. rosea* Sotomayor⁵ reporta un módulo de rigidez de $G_{LT} = 879 \text{ MN m}^{-2}$ correspondiente a una densidad $\rho_{CH} = 592 \text{ kg m}^{-3}$; y para *Q. scytophylla* Sotomayor⁹ reporta un módulo de rigidez de $G_{LT} = 1294 \text{ MN m}^{-2}$ correspondiente a una densidad $\rho_{CH} = 933 \text{ kg m}^{-3}$. Respecto a las especies japonesas, Komán y Feher¹⁰ reportan para *P. tomentosa* una densidad $\rho_{CH} = 300 \text{ kg m}^{-3}$ y un módulo de rigidez de $G_{LT} = 703 \text{ MN m}^{-2}$; Anshari et al.⁴ reportan para *C. japonica* una densidad de $\rho_{CH} = 360 \text{ kg m}^{-3}$ correspondiente a un módulo de rigidez de $G_{LT} = 784 \text{ MN m}^{-2}$; y Naruse⁶ reporta para *F. crenata* una densidad $\rho_{CH} = 740 \text{ kg m}^{-3}$ y un módulo de rigidez $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$.

La figura 3 presenta dos correlaciones entre módulos de rigidez y densidades. La primera correlación se refiere a la de seis maderas de esta investigación. La segunda correlación representa el cálculo con datos de 26 especies recolectados en la bibliografía (tabla I). Se comparan las tendencias entre las correlaciones de los datos reportados.

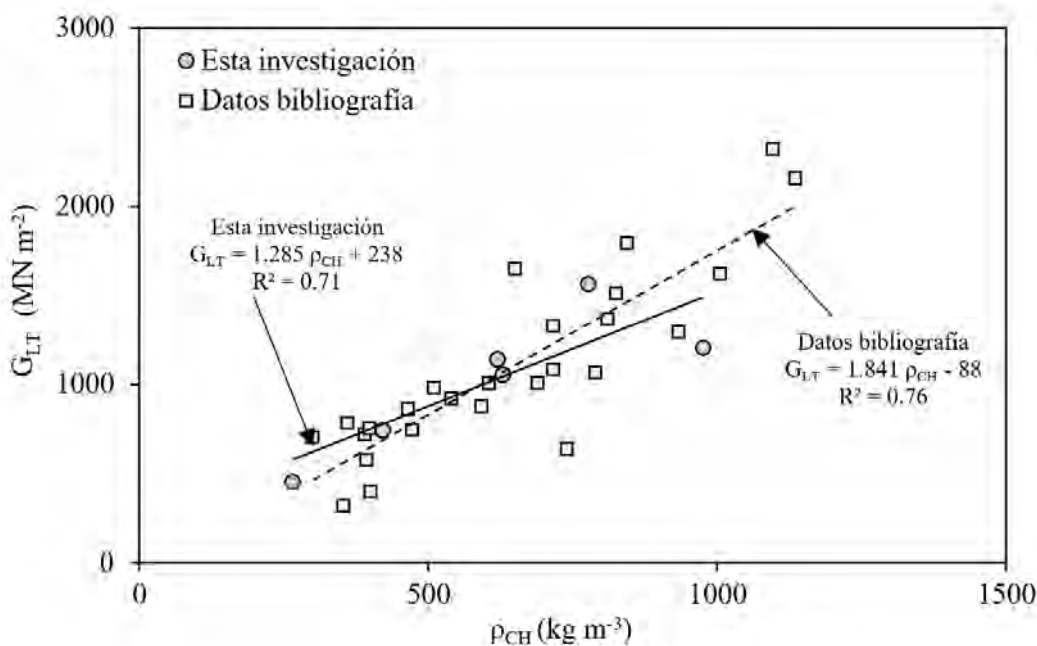


Fig. 3. Correlaciones entre los módulos de rigidez (G_{LT}) y las densidades (ρ_{CH}).

Se observa que las seis maderas de esta investigación presentan un fuerte coeficiente de determinación ($R^2 = 0.71$), aunque menor que el correspondiente a las maderas de la bibliografía, el cual también es importante ($R^2 = 0.76$). Estos resultados coinciden con las tendencias reportadas en la bibliografía^{3,5,29} para los módulos de rigidez y las densidades, y son análogos a los modelos de predicción para módulos de elasticidad y de ruptura publicados.^{30,31,32} Así se confirma el paradigma vigente en ciencias de la madera, el cual propone que la densidad de la madera es la característica física que predice su resistencia mecánica. Sin embargo, Olsson y Källsner¹³ de manera numérica y Guan et al.³³ experimentalmente, no reportan correlaciones estadísticas significativas entre densidades y módulos de rigidez determinados por vibraciones transversales de maderas de *Picea abies* y *Abies alba*.

El origen de las diferencias en magnitudes y relaciones entre el módulo de rigidez y la densidad de la madera puede ser explicado desde dos perspectivas. La primera es la influencia de la estructura material y el estado de la madera. Es decir, sus caracteres genéticos,^{34,35} su heterogeneidad anatómica,^{36,37} sus propiedades de anisotropía material,^{38,39} así como sus propiedades higroscópicas.^{40,41} Como resultado, la biodiversidad en las

especies de madera resulta en la combinación de estos factores y en su impacto en las mediciones para cada especie, individuo (árbol) y espécimen (probeta) observados. El segundo enfoque es considerar el tipo de sollicitación aplicada (axial, flexión, torsión),^{42,43} así como la velocidad de deformación (estática, dinámica).^{44,45}

CONCLUSIONES

Se determinaron las densidades y los módulos de rigidez con pruebas de torsión dinámica en tres maderas japonesas (*P. tomentosa*, *C. japonica* y *F. crenata*), así como en tres maderas mexicanas (*P. pseudostrobus*, *T. rosea* y *Q. scytophylla*). Las magnitudes de los módulos de rigidez son comparables con las de investigaciones en otras especies. Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas entre densidades y módulos de rigidez de las seis especies.

Los resultados sugieren que es conveniente caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera y debe llevarse a cabo con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. A partir de la obtención de observaciones estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten un comportamiento similar.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Las maderas japonesas fueron proporcionadas por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

REFERENCIAS

1. Wang, Z., Xie, W., Wang, Z., y Cao, Y., “Strain method for synchronous dynamic measurement of elastic, shear modulus and Poisson’s ratio of wood and wood composites”, *Construction and Building Materials* 182, 608–619 (2018).
2. Hernández, S.A. y Sotomayor, J.R., “Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*”, *Madera y Bosques* 20(3), 113-123 (2014).
3. Sotomayor, J.R., “Características dinámicas de 22 maderas determinadas por el método de vibraciones transversales”, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48), 1-23 (2018).
4. Anshari, B., Guan, Z.W., Kitamori, A., Jung, K., Hassel, I., y Komatsu, K., “Mechanical and moisture-dependent swelling properties of compressed Japanese cedar”, *Construction and Building Materials* 25(4), 1718-1725 (2011).
5. Sotomayor, J.R., “Módulos de rigidez dinámicos de siete maderas mexicanas determinados por vibraciones en torsión”, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(2), 125-134 (2016).
6. Naruse, K., “Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests”, *Journal of Wood Science* 49(6), 479-484 (2003).
7. Ozyhar, T., Hering, S., Sanabria, S.J., y Niemz, P., “Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves”, *Wood Science and Technology* 47(2), 329- 341 (2013).
8. Nadir, Y., Nagarajan, P., y Midhun, A.J., “Measuring elastic constants of *Hevea brasiliensis* using compression and Iosipescu shear test”, *European Journal of Wood and Wood Products* 72(6), 749-758 (2014).
9. Sotomayor, J.R., Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia (2015).
10. Komán, S. y Feher, S., “Physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa* wood planted in Hungaria”, *Wood Research* 62(2), 335-340 (2017).
11. Kránitz, K., Deublein, M., y Niemz, P., “Determination of dynamic elastic moduli and shear moduli of aged wood by means of ultrasonic devices”, *Materials and Structures* 47(6), 925-936 (2014).
12. Yoshihara, H., “Shear modulus and shear strength evaluation of solid wood by a modified ISO 15310 square-plate twist method”, *Drvna Industrija* 63(1), 51-55 (2012).
13. Olsson, A. y Källsner, B., “Shear modulus of structural timber evaluated by means of dynamic excitation and FE analysis”, *Materials and Structures* 48(4), 977-985 (2013).

14. Cha, J.K., "Determination of true modulus of elasticity and modulus of rigidity for domestic woods with different slenderness ratios using nondestructive tests", *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 43(1), 36-42 (2015).
15. Roohnia, M. y Kohantorabi, M., "Dynamic methods to evaluate the shear modulus of wood", *BioResources* 10(3), 4867-4876 (2015).
16. Keunecke, D., Sonderegger, W., Pereteanu, K., Lüthi, T., y Niemz, P., "Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves", *Wood Science and Technology* 41(4), 309-327 (2007).
17. Sotomayor, J.R. y Villaseñor, J. M., "Módulo de rigidez y módulo dinámico de la madera de *Acer saccharum* Marshall y *Thuja plicata* L.", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 13(33), 20-28 (2016).
18. International Organization for Standardization. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva (2014).
19. International Organization for Standardization. ISO 13061-2:2014. Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva (2014).
20. American Society for Testing and Materials (ASTM International). ASTM C1259-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2015).
21. American Society for Testing and Materials (ASTM International). ASTM E1876-15. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2015).
22. Harada, T., "Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test", *Fire and Materials* 25(4), 161-167 (2001).
23. Kartal, S.N., Hwang, W., y Imamura, Y., "Combined effect of boron compounds and heat treatments on wood properties: Chemical and strength properties of wood", *Journal of Materials Processing Technology* 198(1), 234-240 (2008).
24. Akyildiz, M.H. y Kol, H.S., "Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) Wood", *Journal of Environmental Biology* 31(3), 351-555 (2010).
25. Kaygin, B., Kaplan, D., y Aydemir, D., "Paulownia Tree as an Alternative Raw Material for Pencil Manufacturing", *BioResources* 10(2), 3426-3433 (2015).
26. Miyoshi, Y., Kojiro, K., y Furuta, Y., "Effects of density and anatomical feature on mechanical properties of various wood species in lateral tension", *Journal of Wood Science* 64(5), 509-514 (2018).
27. Silva, J.A., Fuentes, F.J., Rodríguez, R., Torres, P.A., Lomelí, M.A., Ramos, J., Waitkus, C. y Richter, H.G., *Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas*, Comisión Nacional Forestal, México (2010).
28. Tamarit, J.C. y López, J.L., *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México (2007).
29. Ehrhart, T. y Brandner, R., "Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft-and hardwood species", *Engineering Structures* 172, 554-572 (2018).
30. Onoda, Y., Richards, A.E., y Westoby, M., "The relationship between stem biomechanics and wood density is modified by rainfall in 32 Australian woody plant species", *The New Phytologist* 185(2), 493-501 (2010).
31. Baar, J., Tippner, J., y Rademacher, P., "Prediction of mechanical properties - modulus of rupture and modulus of elasticity - of five tropical species by nondestructive methods", *Maderas. Ciencia y tecnología* 17(2), 239-252 (2015).
32. Guan, C., Zhang, H., Hunt, J.F., y Yan, H., "Determining shear modulus of thin wood composite materials using a cantilever beam vibration method", *Construction and Building Materials* 121, 285-289 (2016).
33. Cavalli, A., Cibecchini, D., Goli, G., y Togni, M., "Shear modulus of old timber", *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(2), 446-450 (2017).
34. Fernandes, C., Gaspar, M.J., Pires, J., Alves, A., Simões, R., Rodrigues, J.C., Silva, M.E., Carvalho, A., Brito, J.E., y Lousada, J.L., "Physical, chemical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* wood at five sites in Portugal", *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(4), 669-679 (2017).

35. Hayatgheibi, H., Fries, A., Kroon, J., y Wu, H.X., "Genetic analysis of lodgepole pine (*Pinus contorta*) solid-wood quality traits", *Canadian Journal of Forest Research* 47(10), 1303-1313 (2017).
36. Hofstetter, K., y Gamstedt, K., "Hierarchical modelling of microstructural effects on mechanical properties of wood. A review", *Holzforschung* 63(2), 130-138 (2009).
37. Uetimane Jr, E., y Ali, A.C., "Relationship between mechanical properties and selected anatomical features of Ntholo (*Pseudolachnostylis maprounaefolia*)", *Journal of Tropical Forest Science* 23(2), 166- 176 (2011).
38. Brémaud, I., Gril, J., y Thibaut, B., "Anisotropy of wood vibrational properties: dependence on grain angle and review of literature data", *Wood Science and Technology* 45(4), 735-754, (2011).
39. Machado, J.S., Louzada, J.L., Santos, A. J.A., Nunes, L., Anjos, O., Rodrigues, J., Simões, R.M.S., y Pereira, H., "Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.)", *Materials and Design* 56, 975-980 (2014).
40. Jiang, J., Lu, J., y; Cai, Z., "The vibrational properties of Chinese fir wood during moisture sorption process", *BioResources* 7(3), 3585-3596 (2012).
41. Sheikh, A.A., y Stergios, A., "Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments", *Applied Acoustics* 140, 92-99 (2018).
42. Oberhofnerová, E., Arnetová, K., Holeček, T., Borůvka, V., y Bomba, J., "Determination of correlation between destructive and nondestructive test methods applied on modified wood exposed to natural weathering", *BioResources* 11(2), 5155-5168 (2016).
43. Pierrejean, I., Mehinto, T., y Beauchene, J., "Comparative analysis of three different methods used to determine the elastic modulus for a choice of tropical Guianese wood species", *Pro Ligno* 13(1), 3-17 (2017).
44. Chauhan, S., y Sethy, A., "Differences in dynamic modulus of elasticity determined by three vibration methods and their relationship with static modulus of elasticity", *Maderas. Ciencia y tecnología* 18(2), 373-382 (2016).
45. Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., y Crews, K., "A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood", *Construction and Building Materials* 102, 963-976 (2016).

Colaboradores

Arroyo Mayorga, Yessica Marlen

Ingeniera en Materiales graduada en 2022. Cuenta con la certificación en sustentabilidad otorgada por Dassault Systèmes. Su enfoque en ingeniería de materiales se especializa en el área de materiales, polímeros y sustentabilidad. Actualmente cursa la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Cabriaes Gómez, Roberto Carlos

Ingeniero Mecánico Eléctricista, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con especialidad y Doctorado en Ingeniería de Materiales por la FIME-UANL. Es miembro del SNII y cuenta con el Perfil del PRODEP. Trabaja como profesor investigador de tiempo completo y se desempeña como Jefe de Departamento de Certificaciones SolidWorks en la UANL-FIME. Entre sus distinciones se cuentan el premio a la Mejor Tesis de Maestría de la UANL en el área de Ingeniería y Tecnología, el Premio Estatal de la Juventud, y el Premio a la Invención UANL 2020.

Cobos Zaleta, Diana

Ingeniera Mecánica Electricista y Maestra en Ciencias de la Ingeniería de Sistemas. Es profesora de tiempo completo, miembro del Cuerpo Académico “Ciencias Aplicadas a la Ingeniería Avanzada” en la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Martínez De la Cruz, Azael

Licenciado en Química Industrial por la Universidad Autónoma de Nuevo León (1992) y Doctor en

Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid (1997). Desde 2005 es profesor investigador Titular de la FIME dentro del posgrado en Ingeniería de Materiales. Sus áreas de interés se enfocan a la búsqueda de óxidos semiconductores con potencial aplicación como fotocatalizadores para el tratamiento de aguas industriales residuales y purificación de aire por eliminación de gases contaminantes mediante el aprovechamiento de la energía solar. Es Nivel 3 del SNII.

Miranda-Valdez, Isaac Yair

Aalto University. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Física. Miembro de la Sociedad Europea de Reología.

Nava Núñez, Magaly Yajaira

Ingeniera Civil por el Instituto Tecnológico de Cd. Victoria (2008) y Doctora en Ingeniería de Materiales por la Universidad Autónoma de Nuevo León (2020). Desde el 2023 es profesora de tiempo completo en la Universidad Tecnológica Gral. Mariano Escobedo dentro de la Carrera Mantenimiento área Industrial. Sus áreas de interés están enfocadas en la preparación de óxidos semiconductores para su adición en materiales de construcción con aplicaciones avanzadas de purificación de aire y autolimpieza. Es Nivel Candidato del SNII.

Puente Córdova, Jesús Gabino

Doctorado en Ingeniería de Materiales por la UANL, Profesor Investigador de la FIME-UANL, miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel I. También es miembro del cuerpo académico “Problemas Multidisciplinarios de Ingeniería”. Sus áreas de interés son el cálculo

fraccionario, materiales viscoelásticos y sistemas poliméricos.

Rentería Baltiérrez, Flor Yanhira

Graduada del Doctorado en Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Es Profesora de la Facultad de Ciencias Químicas y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel I.

Reyes Osorio, Luis Arturo

Ingeniero Mecánico Administrador en la Universidad Autónoma de Nuevo León, al igual que los grados de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con Especialidad en Materiales y Doctor en Ingeniería de Materiales. Su experiencia profesional radica en el estudio de procesos de unión, manufactura y modelado de estructuras. Participa en el posgrado en Ingeniería Aeronáutica y en la Maestría en Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Es líder del cuerpo académico en Ciencias de

la Ingeniería Avanzada. Actualmente es Investigador Nacional Nivel 1.

Segura Méndez, Karla Louise

Ingeniero en Materiales por la FIME-UANL. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales en la FIME. Sus áreas de interés son los materiales viscoelásticos y la aplicación del cálculo fraccional.

Sotomayor Castellanos, Javier Ramón

Licenciatura en Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Maestría en Ciencias de la Madera, Instituto Politécnico Nacional de Lorena, Francia. Doctorado en Ciencias de la Madera, Universidad Laval, Canadá. Actualmente profesor en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Información para colaboradores



Se invita a estudiantes, docentes, investigadores, profesionistas y demás interesados en difundir sus trabajos científicos y tecnológicos, a colaborar con sus artículos en la revista Ingenierías.

LINEAMIENTOS EDITORIALES

Es requisito que las colaboraciones sean producto del trabajo directo de los autores, estableciendo claramente su contribución, y que estén escritas en un lenguaje claro y accesible. Se sugiere que las contribuciones no estén redactadas en primera persona. El número máximo de autores por artículo es cinco.

Todos los artículos recibidos estarán sujetos a arbitraje de tipo doble ciego, siendo el dictamen inapelable. Los criterios aplicables a la selección y dictaminación de textos serán: originalidad, rigor científico, exactitud de la información y la claridad en el lenguaje.

Los artículos aprobados estarán sujetos a revisión de estilo.

Los autores aceptan que la publicación de sus artículos en la revista Ingenierías implica ceder los derechos de autor a la UANL.

CRITERIOS EDITORIALES

Los autores de artículos de revisión o divulgación deberán presentar trabajos que ofrezcan una panorámica del campo temático, separar las dimensiones del tema y presentar una conclusión que se derive del material presentado.

Las contribuciones sobre modelación y simulación deberán estar científicamente validadas dentro del propio trabajo.

No se consideran para publicación protocolos de investigación, manuales, proyectos, propuestas o trabajos inconclusos.

Los artículos extensos y divididos en partes deberán enviarse en su totalidad, pues se arbitrarán como un solo manuscrito.

INSTRUCCIONES DE ENVÍO

La propuesta de publicación consistirá en lo siguiente: 1) manuscrito del artículo con autores (.docx y .pdf), 2) manuscrito del artículo sin autores (.docx), 3) material gráfico en alta resolución (300 dpi y 15 cm en su lado más corto, .tif, .eps, .jpg o .bmp) y 4) fichas biográficas de cada autor con un máximo de 150 palabras (.docx). Estos archivos se deberán enviar a través de la plataforma digital de la revista (<https://ingenierias.uanl.mx/index.php/i>). Adicionalmente, se deberán llenar los campos de información que se soliciten en la plataforma.

La extensión de los artículos no deberá exceder de 15 cuartillas tamaño carta (incluyendo material gráfico) en tipografía Times New Roman de 11 puntos en interlineado sencillo.

Los artículos deberán incluir un resumen tanto en español como en inglés, de no más de 150 palabras, así como un máximo de 5 palabras clave, tanto en español como en inglés.

Las referencias deberán ir numeradas en el orden de citado en el texto. La bibliografía deberá seguir el formato de citación APA 7ª ed.

El material gráfico, además de estar incluido en el artículo, deberá enviarse en archivos individuales.

CONTACTO

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Edificio 7, primer piso, ala norte.

Tel.: 8329-4000 Ext. 5854

E-mail: revistaingenierias@uanl.mx



Autores

Criterio de autoría o coautoría

Se considera autor o coautor a quien haya contribuido significativamente a la conceptualización, desarrollo, ejecución, análisis, discusión o redacción del trabajo.

Los autores deben:

Presentar un manuscrito inédito que contenga una narración concisa y exacta del trabajo desarrollado, así como una discusión objetiva de su significado intelectual y científico.

Incluir detalles suficientes y referencias a fuentes de información públicas que cumplan con las condiciones necesarias para la confirmación o falsación científica del trabajo por terceros.

Citar aquellas publicaciones que son antecedentes esenciales para comprender el trabajo.

Incluir a los coautores fallecidos, asentando la fecha de su muerte.

Incluir a los coautores que hayan cambiado de afiliación durante el proceso de preparación y publicación del documento, señalando el evento en una nota.

Reconocer mediante una nota de agradecimiento el apoyo de las instituciones y organismos que hayan contribuido significativamente al desarrollo del trabajo, así como a colaboradores que hayan contribuido de manera importante, incluyendo a fallecidos o a quienes hayan cambiado de afiliación, pero sin que hayan llegado a cumplir con el criterio de coautoría, si los hubiera.

Responsabilizarse del material que presentan en su manuscrito.

Atender puntualmente las críticas y observaciones emitidas por los revisores como parte del proceso de evaluación.

Los autores deben abstenerse de:

Ofrecer manuscritos que se encuentren en consideración por otras publicaciones.

Presentar críticas que no tengan relación con la materia del manuscrito.

Incluir información que hayan obtenido mediante comunicación privada, por lo que no se podrían localizar en fuentes públicas.

Incluir información que hayan obtenido de manera confidencial sin el permiso explícito correspondiente.

Incluir información obtenida en el proceso de servicios confidenciales, tales como documentación para concursos, revisión de otros manuscritos, o solicitudes de becas.

Citar publicaciones que no se relacionen o que sólo se relacionen remotamente con la materia.

Incluir como autores a terceros que no cumplan con el criterio de coautoría.

Utilizar nombres ficticios o pseudónimos.

Revisores

Los revisores deben:

Considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Manifestar al editor cualquier conflicto de intereses que detecten.

Declinar cualquier invitación para evaluar un manuscrito si no se consideran calificados, carecen de tiempo para juzgar o se les presenta algún conflicto de intereses, tal como encontrarse vinculados estrechamente a los autores o al trabajo a evaluar.

Evaluar el manuscrito enviado para su consideración, y emitir su fallo correspondiente en tiempo y forma.

Explicar y apoyar sus juicios de manera suficiente para que el editor, los miembros de cuerpo editorial y los autores comprendan el fundamento de sus observaciones.

Sugerir de manera fundamentada las modificaciones o trabajo adicional que considere necesarias para que los autores remedien en su oportunidad las deficiencias de un manuscrito cuyo fallo no sea favorable.

Considerar en su revisión la calidad del material gráfico que se presente en el manuscrito.

Considerar en su revisión aspectos de redacción y ortografía.

Considerar en su revisión posibles errores o fallas de los autores al citar el trabajo relevante de otros.

Informar al editor si encontraran alguna semejanza substancial entre el manuscrito y cualquier otro trabajo.

Los revisores deben abstenerse de:

Conservar, difundir o utilizar información, argumentos o interpretaciones no publicados contenidos en el manuscrito posteriormente al proceso de evaluación.

Contactar a los autores, si hubieran inferido su identidad, previamente a haber emitido su fallo.

Sugerir la inclusión de material y citas que no sean relevantes para la discusión y conclusiones que se presenten en el manuscrito.

Expresar críticas que no tengan relación con la materia del manuscrito.

Editor

El editor debe:

Considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Dar consideración justa e imparcial a todos los manuscritos ofrecidos para su publicación, juzgando cada uno de sus méritos científicos o tecnológicos, sin prejuicios de raza, género, religión, creencia, origen étnico, ciudadanía, posicionamiento filosófico o político de los autores.

Explicar y apoyar su juicio final para que los autores comprendan el fundamento de sus observaciones y sugerencias.

Respetar la independencia intelectual de los autores.

Procesar los manuscritos con diligencia.

Ejercer su responsabilidad y la autoridad para aceptar o rechazar un artículo enviado para su publicación.

Delegar en los miembros del consejo editorial o comité técnico la autoridad para aceptar o rechazar un manuscrito

enviado para su publicación en casos en que se presente algún conflicto de intereses con él.

Delegar la responsabilidad y autoridad editorial en alguno de los miembros de los consejos editoriales cuando él sea autor o coautor de un manuscrito sometido a consideración de la revista.

El editor debe abstenerse de:

Utilizar la información, argumentos o interpretaciones no publicados desplegados en un manuscrito sometido a revisión.

Compartir información sobre un manuscrito en proceso de revisión o publicación a ninguna persona fuera de aquellos a quienes se les solicite consejo profesional.

Expresar críticas que no tengan relación con la materia del manuscrito.

Cuerpo Editorial

(Consejos Editoriales y Comité Técnico)

Los miembros del cuerpo editorial deben:

Estar dispuestos a otorgar consejo al editor en las situaciones requeridas.

Declinar cualquier invitación para brindar consejo si se les presenta algún conflicto de intereses, tal como encontrarse vinculados estrechamente con los autores o con el trabajo a evaluar.

Manifestar al editor cualquier conflicto de intereses que detecten.

Considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Explicar y apoyar sus juicios de manera suficiente para que el editor, los miembros de cuerpo editorial y los autores comprendan el fundamento de sus observaciones.

Respetar la independencia intelectual de los autores.

Los miembros del cuerpo editorial deben abstenerse de:

Conservar, difundir o utilizar información, argumentos o interpretaciones no publicados contenidos en un manuscrito sometido a evaluación.

Compartir información sobre un manuscrito en proceso de revisión o publicación a ninguna persona fuera de aquellos a quienes se les solicite consejo profesional bajo las mismas restricciones.

Expresar críticas que no tengan relación con la materia del manuscrito.

