Año 19
ISSN: 2683-1848
Latindex folio: 30518
julio - septiembre 2023

CienciAcierta

Universidad Autónoma de Coahuila

CONTENIDO No. 75

Microplásticos (MP): Clasificación, aplicación y remoción

Riesgo de diabetes a largo plazo en estudiantes universitarios mediante un instrumento de tamizaje simplificado

Las características personales para el mantenimiento de la actividad física desde el modelo transteórico en psicología de la salud

Ozono para el tratamiento de aguas residuales.

Biopolímeros y algunas de sus aplicaciones

Textiles con propiedades antimicrobianas para el control de las infecciones intrahospitalarias

Aprovechamiento de residuos para la obtención de un biomaterial: Hidroxiapatita

Influencia de los parámetros de depósito de películas delgadas semiconductoras de óxido de cobre por SILAR

Nanotubos de carbono en aplicaciones médicas

Dimensión fractal de macizos carbonatados fracturados naturalmente. Ejemplo de la formación aurora, noreste de México.

Biocarbon: una revisión de literatura sobre sus propiedades, métodos de caracterización y aplicaciones

Tendencias en el desarrollo de biosensores para el monitoreo de arsénico en agua

La asignatura de “ciudadanía” en el currículo de la Universidad Autónoma de Coahuila como acicate para la formación de virtudes cívicas en los estudiantes de educación media y superior.

Implementación del protocolo “código trauma” en pacientes politraumatizados en un hospital de Saltillo: Estudio Piloto.

Mejora en la eficiencia de absorción de un sistema de películas delgadas de CdS-CdTe mediante el uso de nano rejillas de ITO para aplicaciones fotovoltaicas.

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO UADEC

latindex

creative commons

No. 75

Saltillo, Coahuila, México

CienciAcierta
Revista científica, tecnológica y humanistica

ISSN: *2683-1848*

Publicada desde 2005

CienciAcierta, año 19, No. 75, julio - septiembre 2023, es una publicación trimestral editada por la Universidad Autónoma de Coahuila, boulevard Venustiano Carranza s/n colonia República Oriente, C.P. 25380, Saltillo, Coahuila, Editor Responsable: Ing. Carlos Federico Robledo Flores. Reserva de Derechos al uso exclusivo **No. 04-2019-010914143600-203**, **ISSN: 2683-1848**, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Departamento de Divulgación Científica de la Dirección de Investigación y Posgrado UA de C, Ing. Carlos Federico Robledo Flores, Edificio “D” planta alta, unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, fecha de última modificación, 16 de julio de 2023.

Consejo Ejecutivo Editorial:

Dra. Anna Ilina
Editor
annailina@uadec.edu.mx

Dr. David Castro Lugo
CISE-Universidad Autónoma de Coahuila
david.castro@uadec.edu.mx

Dr. José María Guajardo Espinoza
Editor asociado
Universidad Autónoma de Coahuila
jguajar@uadec.edu.mx

Ing. Carlos Federico Robledo Flores
Departamento editorial
Universidad Autónoma de Coahuila
carlos.robledo@uadec.edu.mx

Dr. José Sandoval Cortes
Subdirector Administrativo - DIP
Universidad Autónoma de Coahuila
josesandoval@uadec.edu.mx

Dr. Cristóbal Noé Aguilar González
Grupo de Bioprocesos
Universidad Autónoma de Coahuila
cristobal.aguilar@uadec.edu.mx

Dr. José Luis Martínez Hernández
Subdirector de Posgrado - DIP
Universidad Autónoma de Coahuila
Jose-martinez@uadec.edu.mx

Comité técnico editorial nacional e internacional

Dr. Jesús Alberto Montalvo Morales
Administración
Relaciones Internacionales-UAdeC
jesusmontalvo@uadec.edu.mx

Dra. Gabriela De La Peña Astorga
Comunicación
FCC-Universidad Autónoma de Coahuila
gabriela.pena@uadec.edu.mx

Dr. Gilberto Aboites Manrique
Sociología
CISE-Universidad Autónoma de Coahuila
gilberto.aboites@uadec.edu.mx

Dra. Irma Delia García Calvillo
Matemáticas
CIMA- Universidad Autónoma de Coahuila
irma.garcia@uadec.edu.mx

Dr. Pablo Ruiz Flores
Ciencias de la Salud
CIB- Universidad Autónoma de Coahuila
pabloruiz@uadec.edu.mx

Dr. José González Tovar.
Psicología
FP- Universidad Autónoma de Coahuila
josegonzaleztovar@uadec.edu.mx
josegtovar82@hotmail.com

Dra. Elda Patricia Segura Ceniceros.
Química
FCQ- Universidad Autónoma de Coahuila
psegura@uadec.edu.mx

Dr. Gustavo Félix Verduzco.
Economía
CISE- Universidad Autónoma de Coahuila.
gustavo.felix@uadec.edu.mx

Juan Carlos Centeno Maldonado
Jurisprudencia
FJ- Universidad Autónoma de Coahuila.
centenojuan@uadec.edu.mx

Dra. Virginia Nevárez Moorillón
Microbiología y ciencias ambientales
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Chihuahua, México
vnevare@uach.mx

Dra. Arely Prado Barragán
Biotecnología y Alimentos
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa México.
lapb@xanum.uam.mx

Dr. Gerardo Gutiérrez Sánchez
Ciencias Químicas y Biológicas
CCRC-The University of Georgia, USA.
gerardo@ccrc.uga.edu

Dr. Guillermo Picó
Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas
Universidad Nacional de Rosario, Argentina
gpico@fbioyf.unr.edu.ar

Dr. Luis Huesca Reynoso
Economía
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, México
lhuesca@ciad.mx

Dr. Manuel Gil Antón
Educación
El Colegio de México
mgil@colmex.mx

Dra. Laura Elena Zendejas Frutos
Educación
INEE
laura.zendejas@inee.edu.mx

CONTENIDO

Microplásticos (MP): Clasificación, aplicación y remoción
Microplastics (MP): Classification, application and removal *6*
María Elena Páez-Hernández, Israel S. Ibarra Ortega, Rosa Luz Camacho-Mendoza, Irma Pérez Silva

Riesgo de diabetes a largo plazo en estudiantes universitarios mediante un instrumento de tamizaje simplificado
Risk of long term diabetes in university students through a simplified screening instrument *22*
Felipe Javier Uribe-Salas, María Soledad Acevedo-Casillas, Juan Felipe Mayo-Carrillo1, Juan Parra-Ávila

Las características personales para el mantenimiento de la actividad física desde el modelo transteórico en psicología de la salud
Personal features for maintenance physical activity through transtheoretical model of health psychology *37*
Alba Serrano-Ceña[1]; Dr. Jose Luis Ybarra Sagarduy

"Ozono para el tratamiento de aguas residuales."
"Ozone for wastewater treatment." *48*
Vicente Daniel Treviño-Rodríguez, Ma. de Jesús Soria-Aguilar, Francisco Raúl Carrillo-Pedroza, Elsa Nadia Aguilera Gonzalez, Marco Antonio Sánchez Castillo

Biopolímeros y algunas de sus aplicaciones
Biopolymers and their applications *65*
M. de J. Laredo – Guia, L. Farías-Cepeda, Adalí O. Castañeda Facio, Y. Karina Reyes Acosta*

Textiles con propiedades antimicrobianas para el control de las infecciones intrahospitalarias
Textiles with antimicrobial properties for the control of hospital-acquired infections *86*
Wendy Y. Villastrigo-López1, Aidé Sáenz-Galindo1, Adali Castañeda-Facio1, Miriam D. Dávila-Medina1, Christian J. Cabello-Alvarado2*

Aprovechamiento de residuos para la obtención de un biomaterial: Hidroxiapatita
Waste utilization to obtain a biomaterial: Hydroxyapatite *117*
Flores Valdez Juanita Daria, Sáenz Galindo Aidé, López Badillo Claudia M, Avalos Belmontes Felipe, Acuña Vazquez Pablo

Influencia de los parámetros de depósito de películas delgadas semiconductoras de óxido de cobre por SILAR
Influence of deposition parameters on copper oxide semiconductor thin films by SILAR *146*
Alondra Lizeth Tobías-López , Víctor Hugo Martínez-Landeros, Luis Alfonso García-Cerda, Sergio García-Villarreal

Nanotubos de carbono en aplicaciones médicas
Carbon nanotubes in medical applications *162*
L.A. Cortés-Castrejón, Y. K. Reyes-Acosta, Gustavo Soria-Arguello, Felipe de Jesús Elizalde Herrera, A. Sáenz-Galindo, Rosa Idalia Narro-Céspedes

Dimensión fractal de macizos carbonatados fracturados naturalmente. Ejemplo de la formación aurora, noreste de México.
Fractal dimension of naturally-fractured carbonate rocks mass. An example from the aurora formation, northeastern México *183*
Dr. Alberto Hernández Rosales, Dr. Yuri Almaguer Carmenates, M. E. D. Karla Rosalyne Lira Méndez, Dr. Roberto Díaz Martínez, Dr. Felipe de Jesús López Saucedo, Ing. José Humberto Briseño González, Dr. Reinaldo Martínez Cruz.

Biocarbon: una revisión de literatura sobre sus propiedades, métodos de caracterización y aplicaciones
Biochar: a review on the properties, characterization methods and applications. ***219***
Ing. Norma Araceli Guel-Najar , Dr. Jorge Carlos Ríos-Hurtado, Dra. Aurora Margarita Pat-Espadas, M.C. Juanita Yazmin Guevara-Chávez, M.C. Fatima Pamela Lara-Castillo

Tendencias en el desarrollo de biosensores para el monitoreo de arsénico en agua
Trends in the development of biosensors for monitoring arsenic in water ***261***
Carmen Natividad Alvarado Canché, Arxel de León Santillán, Roberto Arredondo Valdés, Antonio Serguei Ledezma Perez, Miguel Ángel de León Zapata, Daniel Canseco Caballero, Elan Iñaky Laredo Alcalá

La asignatura de "ciudadanía" en el currículo de la Universidad Autónoma de Coahuila como acicate para la formación de virtudes cívicas en los estudiantes de educación media y superior.
The course of "citizenship" in the curriculum of the Autonomous University of Coahuila as an spur for the training of civic virtues in middle and higher education students. ***276***
Samuel Cepeda Tovar, Miguel Ángel Quirarte Lugo

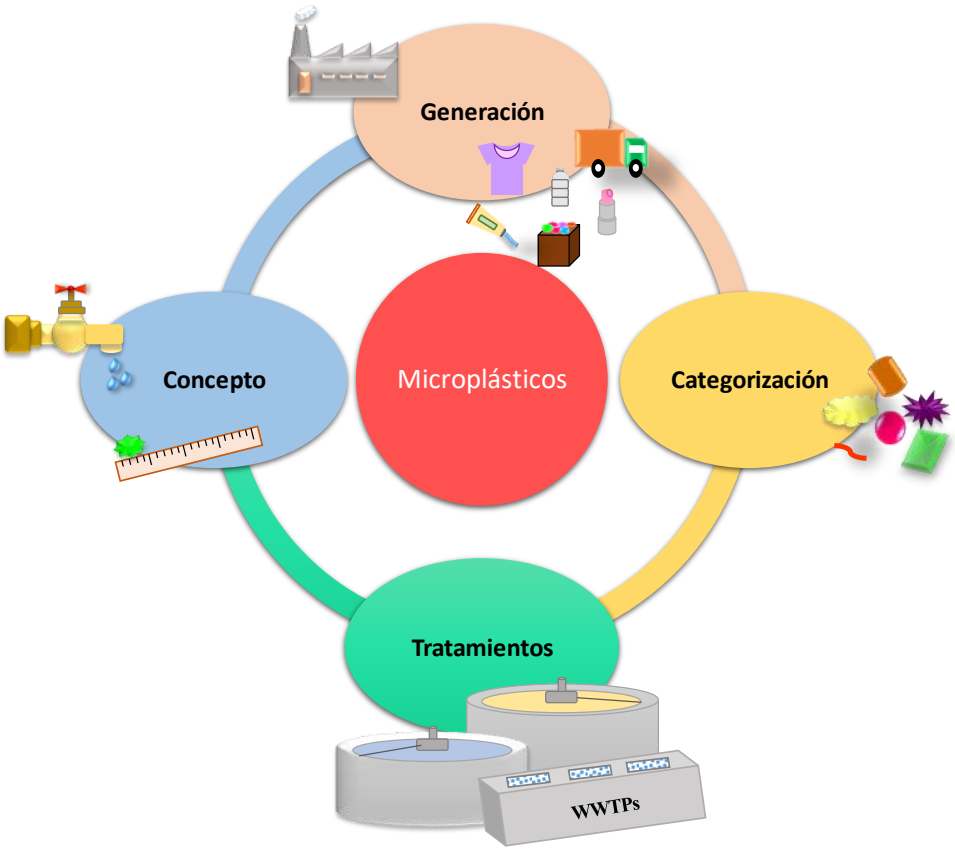
Implementación del protocolo "código trauma" en pacientes politraumatizados en un hospital de Saltillo: Estudio Piloto.
Implementation of the "trauma code" protocol in polytraumatized patients in a Saltillo hospital: Pilot study. ***286***
Mónica Jazmín Niño Coronado, Dalia Gutiérrez González, Ana Cecilia Cepeda Nieto, Marco Aurelio Saucedo Hernández

Mejora en la eficiencia de absorción de un sistema de películas delgadas de CdS-CdTe mediante el uso de nano rejillas de ITO para aplicaciones fotovoltaicas.
Improvement in the absorption efficiency of a CdS-CdTe thin film system by using ITO nano-grids for photovoltaic applications. ***310***
María Isidra Rodríguez González, José Manuel González Vargas, José Javier Sánchez Mondragón, Néstor Lozano Crisóstomo, Julio César García Melgarejo

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Microplásticos (MP): Clasificación, aplicación y remoción

Microplastics (MP): Classification, application and removal



María Elena Páez-Hernández, Israel S. Ibarra Ortega, Rosa Luz Camacho-Mendoza,

Irma Pérez Silva*

Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184,

Pachuca, Hidalgo, México

*Autor para correspondencia : iperez@uaeh.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

La presente revisión tiene por objeto dar a conocer información general sobre los microplásticos (MP) tal como su concepto, clasificación y formas de remoción implementadas en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Un MP es un polímero sintético cuyas dimensiones no exceden los 5mm, dentro de sus propiedades se encuentra la baja biodegradabilidad y su capacidad de adsorber compuestos tóxicos, los cuales al entrar en contacto con un cuerpo de agua pueden ser liberados, por esta razón se encuentran entre los 10 principales problemas de contaminación ambiental. Los MP pueden ser primarios (fabricados para formar parte de un producto como cremas, cosméticos, pastas dentales, jabones, etc.) o secundarios (provienen de la fragmentación de un plástico) lo cual genera que su morfología y composición sea muy diversa lo cual trae como consecuencia que no todas las etapas que se tienen en una planta de tratamiento de aguas residuales tengan la misma eficiencia por lo que es necesario contar con nuevas técnicas de tratamiento como es la electrocoagulación.

Palabras Clave: microplásticos, agua de desecho, tratamiento

Abstract

In this review will explain the generalities about microplastics (MP) such as concept, classification and forms of removal implemented in wastewater treatment plants. MP is a synthetic polymer with dimensions do not more that 5mm, between their properties are low

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

biodegradability and the ability to adsorb toxic compounds which can be released when they come into contact with a body of water. For this reason, they are in the top 10 environmental pollution problems. MP can be primary (designed for a specific product such as creams, cosmetics, toothpastes, soap, etc.) or secondary (result of breakdown of other plastics) which a morphology and composition very diverse, these bring that result that not all the stages in a wastewater treatment plant have the same efficiency, for this reason is necessary to have new treatment techniques such as electrocoagulation.

Keywords: microplastics, wastewater, treatment

1. Introducción

Desde hace más de medio siglo los materiales plásticos sintéticos comenzaron a sustituir diversos materiales naturales en casi todas las áreas, por lo que, se convirtieron en una parte indispensable del desarrollo humano debido a sus propiedades físicas y químicas (por ejemplo, peso ligero, alta resistencia a la corrosión, bajo costo y excelente deformabilidad, mismas características que han ocasionado diversos problemas de contaminación (Fortunato y col., 2010).

En 2021, se reportó que la producción mundial de plásticos fue de alrededor de 390.7 millones de toneladas, de las cuales alrededor de 125 millones fueron fabricadas en China. La producción global fue manufacturada en estas proporciones: 19.3 % es de polipropileno (PP), 14.4% de polietileno de baja densidad (PE-LD), 12.5% de polietileno de alta densidad (PE-HD), 12.9% de cloruro de polivinilo (PVC), 6.2% de tereftalato de polietileno (PET), 5.5% de poliuretano (PUR) y 5.3% de poliestireno (PS) (Plastics Europe, 2022). Por otro

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

lado, en 2018, México reportó una producción de estos en 7 millones de toneladas, de las cuales 48% se utilizan en el envasado de diversos productos, 12% en construcción, 6% en productos electrónicos y 4% en la industria automotriz por citar solo algunos (Aguirrezabal, 2019).

Aunado a la contaminación ocasionada por la presencia de los plásticos en el medio ambiente, su fabricación emplea diversos compuestos químicos como estabilizadores, pigmentos, etc. Algunos de estos compuestos debido a su alta toxicidad, se encuentran en la lista de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) y la Convención para la Protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste (OSPAR). Por ejemplo, el bisfenol A (empleado en la producción de policarbonato) es capaz de causar efectos disruptores endocrinos, mientras que el estireno y cloruro de vinilo pueden ocasionar efectos cancerígenos y/o mutagénicos. Por lo que, al entrar en contacto estos plásticos con el agua, pueden liberar contaminantes orgánicos persistentes y metales que se encuentran adsorbidos en ellos los cuales estarán disponibles para diversas especies marinas para su ingestión ocasionando un daño para estas especies (Rochman, 2015). Los plásticos pueden sufrir un proceso de meteorización y fragmentación debido a su exposición a diversas condiciones medioambientales tales como los factores abióticos (radiación solar, temperatura y abrasión mecánica) y bióticos (microorganismos) ocasionando así la formación de microplásticos (MP) (Jang y col., 2018). La gran formación de MP los ha convertido en uno de los 10 principales problemas de contaminación ambiental de acuerdo con las Naciones Unidas desde el 2014 (Chang y col., 2022).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Considerando lo anterior, en esta revisión se pretende analizar los diferentes tipos de microplásticos que existen, su identificación y los procesos de eliminación con los que se cuenta actualmente.

2. Concepto de microplásticos (MP)

Un MP se define como un polímero sintético con un límite de tamaño superior de 5 mm y sin un límite inferior específico (Yang y col., 2022). Presentan una gran durabilidad y baja tasa de biodegradación, por lo que ha sido reconocido como un contaminante emergente y potencialmente tóxico. Los MP pueden ingresar a aguas receptoras (aguas residuales y aguas tratadas, y en aguas superficiales, incluidos océanos, lagos y ríos), a través de diversas vías como lo son: la escorrentía de aguas pluviales, el viento, las precipitaciones atmosféricas y las descargas de aguas residuales tratadas (Lechthaler y col., 2020). Su presencia en los diversos ecosistemas, principalmente en el acuático, ocasiona daños físicos a una amplia variedad de organismos marinos tales como peces, al causar obstrucciones intestinales y/o posibles desgarramientos del tracto digestivo, por lo que su correcta clasificación y eliminación es indispensable (Ou y Zeng, 2018).

3. Clasificación de los MP

Los MP se pueden clasificar en primarios y secundarios. Los MP primarios son fabricados y utilizados directamente en diversos productos, tales como pastas dentales, cosméticos, jabones, etc., por lo que son desechados directamente al medio ambiente después de su uso. Por otro lado, los MP secundarios se generan por la fragmentación de grandes partículas de plástico. Un ejemplo de esta es la abrasión de hormigones, neumáticos, carreteras, envases o bien la generación de microfibras textiles durante el proceso de lavado (Ngô y col., 2019).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Ya que la generación de MP es muy variada, es necesario realizar una correcta clasificación (**Figura 1**), lo cual favorecerá su proceso de eliminación. Esta clasificación se puede realizar de forma directa (visual), con microscopia óptica y electrónica (para la identificación de textura y forma), y con técnicas cualitativas y cuantitativas como pirólisis, cromatografía de gases acoplada a masas, espectroscopia Raman, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis térmico, microscopía de fuerza atómica y microanálisis de rayos X (Kavya y col., 2020).

De la clasificación mostrada en la **Figura 1**, la más utilizada para la identificación de los MP es su morfología y composición ya que esto permite identificar las fuentes de contaminación y el tipo de tratamiento que se debe de implementar, tal y como se describe a continuación.

4. Caracterización de los MP presentes en los influentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales

Si bien, la cantidad y tipos de MP presentes en los diversos cuerpos de agua dependen del crecimiento poblacional, las precipitaciones, el uso de suelo, las descargas, etc., es posible analizar su presencia en diversas plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR (Ríos-Mendoza, 2021).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

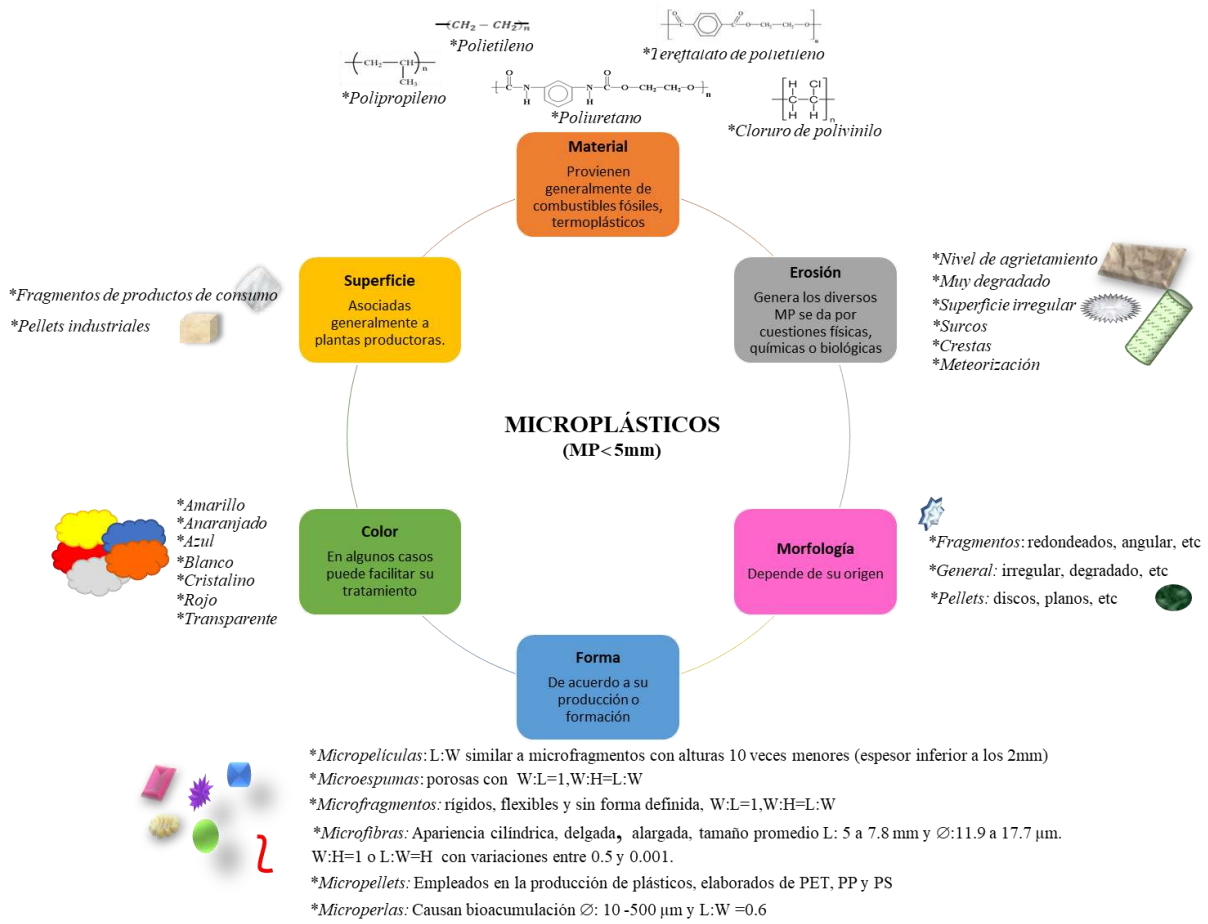


Figura 1. Criterios para la categorización de los microplásticos. L: altura, W: peso, H: espesor (Hidalgo-Ruz y col., 2012; Kooi y Koelmans, 2019; Napper, 2016; Su et al., 2016).

Considerando lo anterior, Bui y col. (2020) realizaron una recopilación de los principales MP presentes en las PTAR de diversas partes del mundo. Este estudio muestra que tanto los microfragmentos como las microfibras, son los MP que se encuentran en mayor proporción en los afluentes (**Figura 2a**). Es importante considerar que durante los procesos de lavado de la ropa sintética se forman hasta 6,000,000 microfibras cuando se lavan telas de poliéster y 700,000 microfibras cuando se trata de tela acrílica (Napper, 2016), mientras que los

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

microfragmentos son el resultado de la degradación de diferentes artículos de plástico lo cual facilita su formación (Zhou y col., 2021).

Lo anterior concuerda con que el PP, PS, PE-LD y PE-HD son los principales materiales encontrados en los MP de las PTAR (**Figura 2b**), ya que este tipo de polímeros son empleados en la fabricación de textiles y envasado de alimentos (Bui y col., 2020). Se sabe también que los MP que ingresan a una PTAR se encuentran en un rango de 650,000 a 65,000,000 microplásticos por día (MP/día), de los cuales, solo entre el 72 y 98% pueden ser eliminados mediante los diversos tratamientos (Magni et al., 2019). Aunado a esto, los MP tienen la capacidad de adsorber diversos contaminantes debido a su hidrofobicidad y gran área superficial al mismo tiempo que al ser ingeridos pueden ocasionar necrosis, pérdida de peso e incluso la muerte a diferentes especies (Ramírez-Álvarez, 2020).

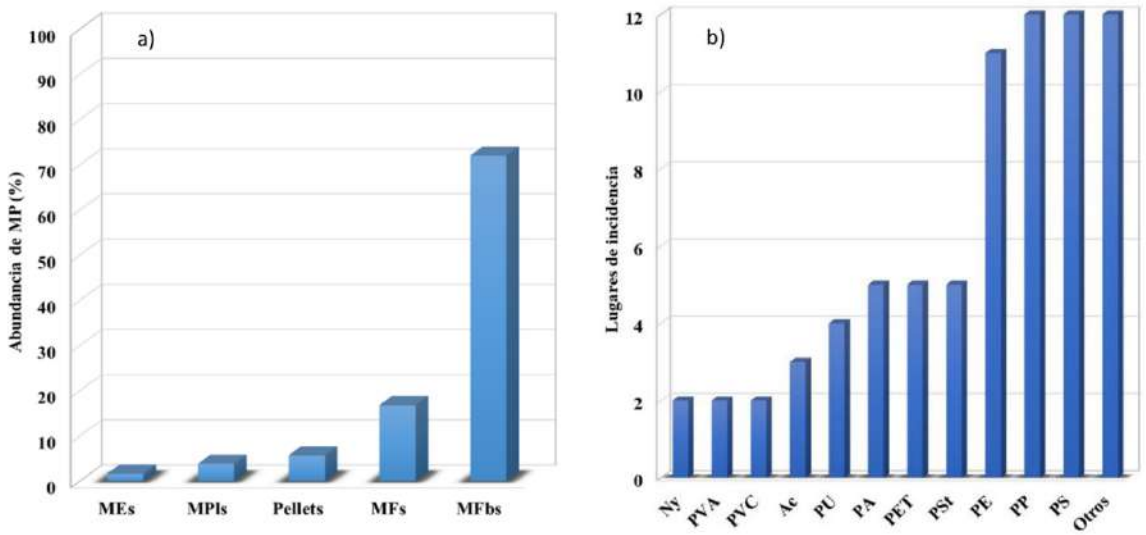


Figura 2. Análisis de los principales MP encontrados en las aguas superficiales de diferentes países. a) Morfología. MFs, microfragmentos; MFbs, microfibras; MPls, micropelículas; MEs,

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

microespumas. b) Material de elaboración. PET, tereftalato de polietileno, PU, poliuretano; PP, polipropileno; PS, poliestireno; Pst, poliéster; Ny, nailon; PVA, alcohol polivinílico; Ac, acrílico; PA, poliamida; PE, polietileno; PVC, cloruro de polivinil (Adaptada de Bui y col, 2020).

Esto ha generado una preocupación con respecto a la emisión directa de MP en los ambientes acuáticos haciendo necesario revisar las etapas generales empleadas en las PTAR para el tratamiento, tal y como se describe a continuación.

Los diferentes MP que ingresan a las PTAR como parte de los afluentes cambia de acuerdo con la región, lo cual influye directamente en la eficiencia de eliminación (**Tabla 1**). Se ha observado que los tratamientos tanto preliminares como primarios son los más eficientes para la eliminación de MP, mientras que un tratamiento secundario puede mejorar la eficiencia de remoción, al mismo tiempo que un tratamiento terciario es más específico.

5. Tratamientos empleados en las PTAR y su eficiencia en la eliminación de microplásticos

Aunado a lo anterior, se han propuesto diversas técnicas especializadas para la eliminación de MP, tal como la electrocoagulación (EC), la cual fue desarrollada y patentada en 1906 por A.E. Dietrich. Esta técnica combina los beneficios de la coagulación, la flotación y la electroquímica, ya que la corriente eléctrica aplicada al sistema permite la colisión y facilita la coagulación de las partículas en tres fases (Figura 3). Los electrodos utilizados son de materiales rentables y no tóxicos como aluminio, hierro y acero inoxidable, los cuales son metales anódicamente insolubles (Ungureanu y col.., 2019). La utilización de esta técnica

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

permite la eliminación del 99.24% de los MP presentes en el agua doméstica e industrial empleando un electrodo de aluminio (Perren y col. 2018).

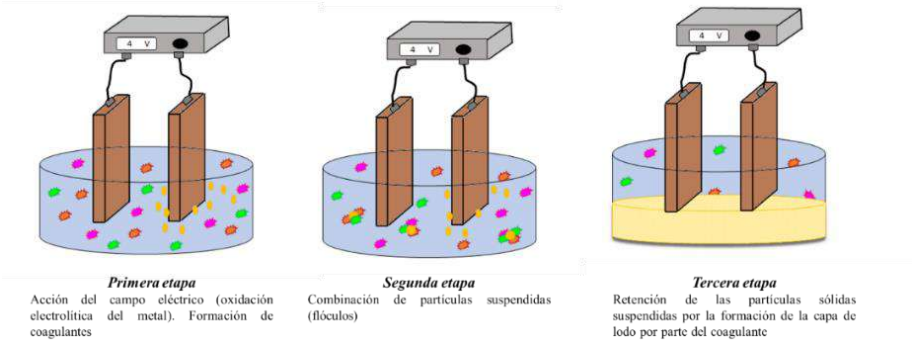


Figura 3. Proceso de Electrocoagulación (Adaptada de Shen y col., 2022)

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tabla 1. Tratamientos implementados para la remoción de los MP presentes en las WWTPs (Reddy y Nair, 2022) (Singh y col. 2021) (Vuori y Ollikainen, 2022)

Tratamiento	Eficiencia (%)	Etapas	Descripción
Preliminar	40-90	Cribado y remoción de arenas	Eliminación de arenas y sólidos de gran tamaño empleando mallas de hasta 0.5 mm lo cual permite retener las fibras de mayor tamaño (con tamaño superior a 300 μm). No tiene costo adicional.
Primario	40-90	Clarificación (desnatado, sedimentación primaria y decantación)	Su eficiencia depende de las características físicas de los MP y su concentración. Puede eliminar más del 60% de las microfibras y fragmentos de gran tamaño (superiores a 100 μm). Sin costo adicional.
Secundario	75-90	Lodos activados	Los microorganismos empleados para la conversión de la materia orgánica presente en el agua residual se acumulan en los MP, esto aumenta su densidad y facilita su sedimentación. Remueve principalmente microfibras y espumas.
Terciario	90-95	Coagulación	Se emplean diversos coagulantes como la poliacrilamida, poliamina y sales de aluminio y hierro. Favorece la eliminación de MP de menor tamaño (<0.5mm). Emplea grandes cantidades de coagulante y tiene baja eficiencia.
		Filtros de disco	Se emplean discos con poros entre 10 μm y 20μm los cuales retienen los MP. Los filtros se pueden dañar por la presión ejercida y por obstrucciones
		Filtros de arena y grava	Los lechos tienen diversas capas que actúan como barrera para los diferentes MP. Su costo es mayor que la implementación de lodos activados.
		Humedales artificiales	Los humedales se diseñan de acuerdo al flujo de agua ((subterráneo, horizontal, y vertical) lo que hace variar la eficiencia. Emplea raíces y sustratos de plantas lo que puede ocasionar que los MP penetren en la membrana celular afectando la remoción de nitrógeno.
Desinfección	~30-38	Desinfección con cloro	En condiciones extremas y largos tiempo de contacto, el cloro oxida a los MP formando enlaces C-Cl lo cual los convierte en ecotóxicos.
		Ozonólisis	El PE, PS, PP y PET pueden ser degradados por el ozono y cambiar sus propiedades físicas y mecánicas como la rugosidad y la hidrofilicidad.
		UV	La degradación de los MP por UV modifica sus propiedades físicas, mecánicas y ópticas. En algunos casos se ha observado un incremento en su concentración, sin embargo, no existen estudios concluyentes.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 4 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

6. Conclusiones

Si bien los materiales poliméricos sintéticos han permitido el desarrollo de la humanidad en diversos ámbitos, también han generado diversos problemas de contaminación. Uno de estos, es la generación de MP los cuales pueden tener diversas morfologías, tamaños y composiciones dificultando su eliminación en las PTAR. Si bien, la mayor cantidad de MP puede ser eliminada en un tratamiento primario y secundario, es necesario contar con técnicas especializadas que permitan que su remoción sea más eficiente. Una de estas alternativas es la electrocoagulación, la cual facilita el tratamiento de las aguas residuales mediante el uso de materiales accesibles y a bajo costo.

7. Agradecimiento

MEPE, ISIO, RLCM e IPS agradecen el apoyo y distinción recibida del SNI.

8. Referencias

Aguirrezabal, I. (2019). Plásticos en México. Oficina Económica y Comercial de España en Ciudad de México (ICEX) DOC2019826983.pdf

Bui, X.T., Vo, T.D.H., Nguyen, P.T., Nguyen, V.T., Dao, T.S. & Nguyen, P.D. (2020). Microplastics pollution in wastewater: Characteristics, occurrence and removal technologies. *Environmental Technology & Innovation*. 19, 101013. DOI:10.1016/j.eti.2020.101013

Chang, X., Fang, Y., Wang, Y., Wang, F., Shang, L., Zhong, R. (2022). Microplastic pollution in soils, plants, and animals: A review of distributions, effects and potential mechanisms. *Science of the Total Environment.* 850, 157857. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157857

Fortunato, A., Cuccolini, G., Ascari, A., Campana, G. & Tani. G. (2010). Hybrid metal-plastic joining by means of laser. *International Journal of Material Forming.* 3, 1131-1134. DOI: 10.1007/s12289-010-0971-1

Hidalgo-Ruz, V., Gutow L., Thompson R.C. & Thiel, M. (2012) Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science Technology*. 46, 3060-3075. DOI: 10.1021/es2031505

Jang, M., Shim, W.J., Han, G.M., Song, Y.K. & Hong, S.H. (2018). Formation of microplastics by polychaetes (Marphysa sanguinea) inhabiting expanded polystyrene marine debris. *Marine Pollution Bulletin*. 131, 365–369. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.04.017

Kavya, A.N.V.L., Sundarrajan, S. & Ramakrishna, S. (2020). Identification and characterization of micro-plastics in the marine environment: A mini review. *Marine Pollution Bulletin.* 160, 111704. DOI:10.1016/j.marpolbul.2020.111704

Kooi, M. & Koelmans, A.A. (2019). Simplifying Microplastic via Continuous Probability Distributions for Size, Shape, and Density. *Environmental Science Technology Letters.* 6, 551−557. DOI: 10.1021/acs.estlett.9b00379

Lechthaler, S., Waldscläger, K., Stauch G., Schüttrumpf, H. (2020). The Way of Macroplastic through the Environment. *Environments*. 7, 73. DOI: 10.3390/environments7100073

Magni, S., Binelli, A., Pittura, L., Avio, C.G., Della Torre, C., Parenti, C.C., Gorbi, S. & Regoli, F. (2019). The fate of microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant. *Science of the Total Environment.* 652:602-610. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.269

Napper, I.E. & Thompson, R.C. (2016). Release of synthetic microplastic plastic fibers from domestic washing machines: effects of fabric type and washing conditions. *Marine Pollution Bulletin*. 112:39–45. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.025

Ngô, P.L., Pramanik, B.K., Shah, K. & Roychand, R. (2019). Pathway, classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants. *Environmental Pollution*. 225, (113326). DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113326

Ou, H. & Zeng, E.Y. (2018). Occurrence and Fate of Microplastics in Wastewater Treatment Plants. In: Zeng, E.Y. (Ed.), Microplastic Contamination in Aquatic Environments, An Emerging Matter of Environmental Urgency. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, Ch. 10, pp. 317-338

Perren, W., Wojtasik, A. & Cai, Q., (2018). Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *ACS Omega*. 3, 3357–3364. DOI: 10.1021/acsomega.7b02037

Plastics– the Facts (2022). [En línea]. Disponible en: https://www.plasticseurope.org. Fecha de consulta: 19 de Noviembre del 2022.

Ramírez-Álvarez, N., Mendoza, L. M. R., Macías-Zamora, J. V., Oregel-Vázquez, L., Álvarez-Aguilar, A., Hernández-Guzmán, F. A., Sánchez-Osorio J. L., Moore C. J., Silva-Jiménez, H. & Navarro-Olache, L. F. (2020). Microplastics: Sources and Distribution in Surface Waters and Sediments of Todos Santos Bay, Mexico. *Science of The Total Environment*. 703, 134838. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.1348

Reddy, A.S., Nair, A.T. (2022). The fate of microplastics in wastewater treatment plants: An overview of source and remediation technologies. Environmental Technology & Innovation, 28, 102815. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102815

Ríos-Mendoza, L. M., Ontiveros-Cuadras, J. F., León-Vargas, D., Ruiz-Fernández, A. C., Rangel-García, M., Pérez-Bernal, L. H., & Sánchez-Cabeza, J.-A. (2021). Microplastic contamination and fluxes in a touristic area at the SE Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112638.

Rochman, C.M., (2015). The Complex Mixture, Fate and Toxicity of Chemicals Associated with Plastic Debris in the Marine Environment. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M. (eds) Marine Anthropogenic Litter. Springer, Cham, pp. 117-140

Shen, M., Zhang, Y., Almatrafi, E., Hu, T., Zhou, C., Song, B., Zeng, Z., Zeng, G. (2022). Efficient removal of microplastics from wastewater by an electrocoagulation process. Chemical Engineering Journal, 428, 1311161. DOI: 10.1016/j.cej.2021.131161

Singh, S., Kalyanasundaram, M., Diwan, V. (2021). Removal of microplastics from wastewater: available techniques and way forward. Water Science & Technology. 84 (12), 3689. DOI: 10.2166/wst.2021.472

Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D. & Shi, H. (2016). Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*. 216, 711–719. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.06.036

Ungureanu, N., Vlăduț, V. & Paraschiv, G., (2019). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. Annals of the University of Craiova - Agriculture, Montanology, Cadastre Series, 49, 206-216

Vuori, L.., Ollikainen, M. (2022). How to remove microplastics in wastewater? A cost-effectiveness analysis. Ecological Economics, 192, 107246. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2021.107246

Yang, S., Zhou, M., Chen, X., Hu, L., Xu, Y., Fu, W., Li, C. (2022). A comparative review of microplastics in lake systems from different countries and regions. *Chemosphere*, 286, 131806. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.131806

Zhou, Y., He, G., Jiang, X., Yao, L., Ouyang, L., Liu, X., Liu, W. & Liu, Y. (2021). Microplastic contamination is ubiquitous in riparian soils and strongly related to elevation, precipitation and population density. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125178. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.125178.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Riesgo de diabetes a largo plazo en estudiantes universitarios mediante un instrumento de tamizaje simplificado

Risk of long term diabetes in university students through a simplified screening instrument

Felipe Javier Uribe-Salas[1], María Soledad Acevedo-Casillas[2], Juan Felipe Mayo-Carrillo[1], Juan Parra-Ávila[1].

[1] El Colegio de la Frontera Norte, Calle Jalisco 1505, Colonia Nísperos, C.P. 26020, Piedras Negras, Coahuila, México.

[2] Universidad Vizcaya de las Américas, Campus Piedras Negras, Coahuila. Av Fidel Villarreal 439, Tecnológico, 26080, Piedras Negras, Coah.

Correspondencia: Felipe J. Uribe Salas, El Colegio de la Frontera Norte.

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9859-5775

Teléfono: 878 782 7207

E-mail: fjuribe@colef.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen:

Los estudiantes universitarios transitan por una etapa entre la adolescencia y la vida adulta que los coloca ante nuevos patrones de comportamiento en los dominios de la familia, la interacción entre pares y con las instituciones educativas, que pueden tener repercusiones en la salud, que por lo general se asocian al riesgo de padecer diabetes *mellitus.* El trabajo tuvo por objeto, analizar las probabilidades de desarrollar diabetes a largo plazo, en estudiantes universitarios, mediante la aplicación de un instrumento de tamizaje simplificado, así como examinar su asociación con las diferentes características de los entrevistados. El proceso fue mediante un diseño transversal en el que se estudiaron 204 alumnos que contestaron un cuestionario sobre características sociodemográficas, antecedentes de diabetes, tabaquismo y actividad física. Además, se tomaron mediciones somatométricas y se aplicó un instrumento simplificado para estudiar el riesgo de diabetes (escala IDRS), analizando su relación con las características de los estudiantes. La mayoría de los alumnos quedó clasificada en la categoría de riesgo bajo de la enfermedad bajo estudio (80.9%) y el resto en la de riesgo medio (19.1%). Los predictores del riesgo medio fueron sexo femenino, obesidad e hipertensión arterial. Aunque la población estudiada muestra un perfil de bajo riesgo, algunas características empiezan a tener peso entre los alumnos clasificados en el riesgo medio, como se indica en los predictores encontrados.

Palabras clave: IDRS, estudiantes de medicina, diabetes, obesidad, evaluación de riesgo.

Abstract

University students transit through a stage between adolescence and adult life that places them in front of new behavioral patterns in domains of the family, the interaction between

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

peers and with educational institutions, which can have repercussions on health and that are associated with the risk of diabetes. This work had the objective of analyze the risk on long term diabetes among university students through the application of a simplified screening instrument, as well as to examine its association with different characteristics of the interviewees. A cross-sectional design was carried out that included 204 university students in Piedras Negras, Coahuila, who answered a questionnaire on sociodemographic characteristics, history of diabetes, smoking and physical activity. Somatometric measurements were taken, and a simplified instrument was applied to study the risk of diabetes (IDRS score), analyzing its relationship with the student´s characteristics. Most students were classified in the low risk category of diabetes (80.9%) and the rest, in the medium risk category (19.1%). Predictors of the diabetes risk were female gender, obesity and high blood pressure. Although the population studied shows a low risk profile for diabetes, some characteristics begin to have weight among the students classified in the medium risk category, as indicated by the predictors found.
Key words: IDRS, medical students, diabetes, obesity, risk assessment.

Introducción

Los estudiantes universitarios en México atraviesan por la etapa de “adulto joven” que va entre 18 y 24 años de edad (Curtis, 2015). Se trata de una población que transita entre la adolescencia y la vida adulta (Gayet, 2019) mediante un proceso de maduración del sistema nervioso central que los coloca ante nuevos patrones de comportamiento en los dominios de la familia, la interacción entre pares y con las instituciones educativas, las cuales pueden tener repercusiones en la salud (Viner y col., 2012). En consecuencia, los universitarios han desarrollado prácticas dietéticas y de salud que se asocian con un mayor riesgo de desarrollar diabetes *mellitus* (Mongiello y col., 2016).

En México se ha reportado un incremento en la prevalencia promedio de sobrepeso y obesidad en la población de adolescentes y adultos jóvenes, mostrando que hay un

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

incremento con la edad en sus magnitudes (Secretaría de Salud, 2020). La importancia epidemiológica del estudio del sobrepeso y la obesidad estriba en que representan un factor de riesgo de enfermedades cardiovasculares y diabetes mellitus tipo 2 (Kim y Popkim, 2006).

La prevalencia de diabetes en población adulta en México se ha estimado en 15% (Secretaria de Salud, 2020), pero se ha observado que, aún en población joven, entre 20 y 39 años, existe una magnitud de 4.5% de casos de diabetes (Secretaría de Salud, 2020). Ante el incremento en la frecuencia de diabetes *mellitus* en México, se elaboraron instrumentos para la detección temprana de esa enfermedad en la población adulta (Velázquez y col., 2000; Guerrero y Rodríguez, 2010). Por otra parte, Mohan y colaboradores (2005), elaboraron y validaron un instrumento simplificado de tamizaje de diabetes (IDRS por sus siglas en inglés) en la India. Asimismo, Singh y colaboradores (2019), aplicaron dicho instrumento a estudiantes universitarios.

Los estudios relativos a sobrepeso, obesidad y diabetes en alumnos universitarios, son escasos en el estado de Coahuila, México. Los trabajos de García García y Cufarfán López (2019) y Magallanes Monrreal et al (Magallanes y col., 2010) sobre obesidad, riesgo cardiovascular y calidad de vida, se realizaron en la Universidad Autónoma de Coahuila en la ciudad de Saltillo. Sin embargo, la frontera norte del estado carece de trabajos realizados en jóvenes universitarios. Cabe mencionar que, en Coahuila, no hay estudios sobre la aplicación de un instrumento de tamizaje de diabetes en universitarios.

Se ha planteado que, en los municipios de la frontera norte de México, existe una desproporcionada mortalidad por enfermedades crónicas al compararla con el resto de municipios del país (Anaya y Al-Delaimy, 2017). Lo anterior sugiere que, en los municipios fronterizos del norte, existe un contexto social y cultural, en términos de hábitos alimenticios y actividad física, favorable al desarrollo de enfermedades crónicas, entre ellas la diabetes. El presente trabajo tiene por objeto analizar el riesgo de diabetes a largo plazo en estudiantes de medicina en la ciudad de Piedras Negras, situada en la frontera norte del estado de Coahuila, mediante la aplicación de un instrumento de tamizaje simplificado, así como

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

analizar su asociación con características de los estudiantes como sexo, estado civil, índice de masa corporal (IMC), tensión arterial, tabaquismo y municipio de origen.

Materiales y Métodos

Mediante un diseño transversal se estudió al total de estudiantes de la Escuela de Medicina de la Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Norte, que en mayo de 2015 contaba con 204 alumnos. El protocolo del estudio fue sometido al Comité de Bioética de El Colegio de la Frontera Norte. Además, con un previo consentimiento informado, se aplicó un cuestionario para indagar características como edad, sexo, grado escolar, estado civil, municipio habitual de residencia, antecedentes hereditarios de diabetes *mellitus* y la práctica actual de tabaquismo.

Asimismo, se utilizó el Cuestionario Internacional de Actividad Física, que analiza dicha actividad durante los últimos siete días en personas entre 15 y 69 años de edad (Craig y col., 2003). En éste, se requiere la construcción de puntajes sumando la duración en minutos y la frecuencia en días para valorar su intensidad (IPAQ Research Committee, 2004).

Se utilizó el método Isak (Stewart y col., 2011) para la toma de medidas atropométricas. Por otra parte, para medir el peso se utilizó una báscula electrónica calibrada marca Seca 803. La talla se tomó con el estudiante en el plano de Frankfurt, utilizando un estadímetro portátil marca Seca 213. La circunferencia de cintura (CC) se tomó con la cinta marca Lufkin W606ME, de fabricación estadounidense. Además. se calcularon los percentiles del IMC con el programa de Excel elaborado por Romero (2009), y se estratificaron por edad y sexo, para un rango de edad entre 2 y 20 años. Dicho programa utiliza las curvas de crecimiento de los Centros para el Control de Enfermedades, con los siguientes puntos de corte: peso bajo por debajo del 5º percentil, normal entre los percentiles 5º y 85º, sobrepeso entre el percentil 85º y el 95º y obesidad por encima del percentil 95º.

La tabla 1 muestra las variables, las categorías y los puntajes del instrumento simplificado de tamizaje de diabetes construido por Mohan y colaboradores (2005). Sobre la base de los

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

puntajes correspondientes a las categorías de las variables seleccionadas, puede verse que el puntaje mínimo es de 0 y el máximo de 100, para construir la variable "riesgo de diabetes" con las siguientes categorías: bajo ≤ 30, medio 31-60 y alto > 60.

Tabla 1.- Variables, categorías y puntajes del instrumento simplificado de tamizaje de diabetes ⁋.

Variables y categorías	Puntaje
Edad en años	
≤35 (referencia)	0
35-49	20
≥50	30
Circunferencia de cintura	
mujeres ≤80cm y hombres ≤90cm	0
mujeres 80-89cm y hombres 90-99cm	10
mujeres ≥90cm y hombres ≥100cm	20
Actividad física	
Inactivo	0
Medianamente activo	20
Activo	30
Antecedentes familiares de diabetes	
Sin antecedentes	0
Uno de los padres	10
Ambos padres	20
Puntajes	
Mínimo	0
Máximo	100

⁋ Instrumento simplificado de tamizaje de diabetes (Mohan y colaboradores, 2005).

Se calcularon razones de momios (RM) crudas entre las categorías del puntaje de riesgo de diabetes y las variables sexo, estado civil, categorías del IMC, tensión arterial, tabaquismo y municipio de residencia habitual. Y mediante una regresión logística binaria y utilizando el método "enter" con el programa SPSS, 18ª versión, se estimaron los predictores del riesgo de diabetes.

Resultados

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Se incluyeron 204 estudiantes, siendo 95 mujeres, que representaron 45% del total. La edad promedio de las mujeres fue de 19.41 años y 19.56 en los hombres, con rango general entre 16 y 34 años. Al momento del estudio había solo seis semestres con 50, 38,33,23, 36 y 25 alumnos por semestre, en orden ascendente.

Los resultados del instrumento de tamizaje simplificado de diabetes se presentan en la tabla 2. Para la edad, el grupo de referencia fue el menor de 35 años (Mohan y col., 2005). Se puede ver que más de dos tercios de las mujeres y cerca de ese monto en los hombres, tuvieron perímetros abdominales en rangos considerados normales. Los puntajes de perímetro abdominal mayores a 90 cm en mujeres y a 100 cm en hombres, mostraron frecuencias de 11.8% y 13.1%, respectivamente.

Tabla 2.- Variables utilizadas para la construcción de la escala de riesgo de diabetes mellitus
en estudiantes universitarios presentadas en forma global y por sexo.

Variables y Categorías	Global n (%)	Mujeres n (%)	Hombres n (%)
Edad			
> 35 años	0	0	0
Circunferencia de cintura			
Mujeres ≤80cm; hombres ≤90	137 (69.2)	71 (76.3)	66 (61.7)
Mujeres 81-89; hombres 91-99	38 (19.2)	11 (11.8)	27 (25.2)
Mujeres ≥ 90; Hombres ≥ 100	23 (11.6)	11 (11.8)	12 (13.1) ‖
Actividad física			
Inactivo	79 (38.7)	48 (50.5)	31 (28.4)
Mínimamente activo	44 (21.6)	21 (22.1)	23 (21.1)
Activo	81 (39.7)	26 (27.4)	55 (50.4) ‖
Antecedentes familiares de diabetes			
Sin antecedentes	177 (87.2)	81 (85.3)	96 (88.9)
Uno de los padres	22 (10.8)	12 (13.7)	9 (8.3)
Ambos padres	4 (2.0)	1 (1.1)	3 (2.8) &
Puntaje de la escala			
0	49 (24.6)	17 (18.3)	32 (30.2)
10	22 (11.1)	5 (5.4)	17 (16.0)
20	29 (14.6)	14 (15.1)	15 (14.2)
30	61 (30.7)	36 (38.7)	25 (23.6)
40	24 (12.1)	15 (16.1)	9 (8.5)

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

50	12 (6.0)	6 (6.5)	6 (5.7)
60	2 (1.0)	0	2 (1.9) ‡
Puntaje (categorías)			
≤ 30	161 (80.9)	72 (77.4)	89 (84.0)
31-60	38 (19.1)	21 (22.6)	17 (16.0) &
> 60	0	0	0

⁋ p<0.05 por prueba de hipótesis de Chi^2; & No Significativa; ‡ Prueba de hipótesis de la diferencia de medias del puntaje de riesgo por sexo (la media para mujeres fue de 24.8, y para hombres de 18.8, p=0.008).

En relación con la actividad física, 38.7% de los estudiantes eran inactivos, 21.6% eran mínimamente activos y 39.7% eran activos. Las mujeres predominaron en la categoría de "inactividad" física, mientras que los hombres lo hicieron en la categoría "activa" (p≤0.05). Del total de estudiantes, 87.2% no tuvieron antecedentes hereditarios directos de diabetes, pero en 10.8% del total uno de los padres era diabético y solo en el 2% ambos padres tenían diabetes.

La prueba de hipótesis de la diferencia de medias de los puntajes de la escala mostró una diferencia mayor en las mujeres que en los hombres (p≤0.05). Con los resultados del instrumento IDSR se construyó una variable dependiente con dos categorías, la primera incluyó a 161 alumnos con un puntaje menor de 30 y la otra, con solo 38 alumnos, tuvo un puntaje de 31 o más.

La tabla 3 muestra el análisis bivariante del riesgo de diabetes. El sexo femenino tuvo un riesgo de diabetes 1.5 veces mayor que los hombres. Aunque el número de estudiantes casados fue pequeño (n=4), el riesgo de diabetes fue 13 veces mayor respecto a los solteros. La prueba de hipótesis de la diferencia de medias de edad entre solteros y casados, mostró un contraste significativo (promedio de edad para solteros 19.3 años y para casados 29.2 años, p=0.01). Los alumnos con obesidad mostraron un riesgo de diabetes 6.1 veces mayor respecto al grupo de referencia (IC95% 6.1-31), y aquellos con hipertensión arterial presentaron un riesgo de diabetes 6.1 veces mayor respecto al grupo de referencia (IC95% 2.2-40.8). No hubo relación con el consumo de tabaco.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Al analizar la ciudad de origen, la gran mayoría de los alumnos (177/204=86.76%) fueron originarios de municipios del estado de Coahuila. Más de un tercio de los estudiantes tuvieron su origen en Piedras Negras (58/177=32.7%). En alumnos de otros estados de la república el porcentaje ascendió a 13.2% (27/204) del total de entrevistados. En relación con la movilidad poblacional, la categoría de referencia estuvo compuesta por educandos del municipio de Piedras Negras y se consideró que el resto de universitarios tuvieron movilidad. No hubo relación entre el municipio de origen con el riesgo de diabetes (tabla 2).

Tabla 3.- Relación entre las categorías del puntaje de la escala de riesgo de diabetes mellitus
y las características demográficas y biomédicas de estudiantes universitarios mediante un análisis de regresión logística binaria.

Variable	No	Prevalencia	RM	IC95%	RM	IC95%
Sexo						
Femenino	93	22.6	1.0			
Masculino	106	16.0	0.65	0.32-1.33&	0.24	0.08-0.72‖
Estado Civil						
Soltero	195	17.9	1.0		1.0	
Casado	4	75.0	13.7	1.4-135.7‖	8.2	0.09-684.3&
IMC						
Peso bajo	14	14.3	1.0		1.0	
Normal	82	3.7	0.22	0.03-1.5&	0.24	0.03-1.7&
Sobrepeso	54	16.7	1.2	0.22-6.3&	1.2	0.2-6.9&
Obesidad	47	51.1	6.1	1.2-31‖	8.0	1.4-45.7‖
Hipertensión						
No	175	17.1	1.0		1.0	
Sí	9	66.7	9.6	2.2-40.8‖	7.8	1.2-52.9‖
Tabaquismo						
Sí	35	22.9	1.0		1.0	
No	162	18.5	0.76	0.3-1.8&	1.1	0.3-4.0&
Municipio						
Otros	135	18.5	1.0		1.0	
PN	58	20.7	1.1	0.5-2.4&	1.2	0.4-3.2&

‖ $p<0.05$; &NS
-2 log de la verosimilitud = 121.395
R2 de Cox y Snell = 0.26
R2 de Negelkerk = 0.42
PN Piedras Negras

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

La tabla anterior también presenta resultados del análisis multivariante. En ella, podemos ver que los predictores del riesgo de diabetes fueron sexo femenino, la presencia de obesidad e hipertensión arterial. No se encontró relación entre el riesgo de diabetes y tabaquismo, ni tampoco con el municipio de origen.

Discusión

Los resultados indican que los entrevistados, aquí analizados, transitan con un perfil de bajo riesgo de diabetes. La edad fue un factor protector ya que, ningún educando, tuvo una edad de 35 años o mayor, por lo que, en el estudio no hubo categoría de alto riesgo de diabetes. Otros estudios realizados en alumnos de medicina con el mismo instrumento de tamizaje, reportaron frecuencias en el grupo de riesgo alto de 1% (Singh y col., 2019), 2% (Gopalakrishnan y col., 2017), 1% (Bhatia y col., 2014) y 6% (Tejashwini, 2020). Asimismo, las frecuencias en el grupo de riesgo medio fueron de 22% (Singh y col., 2019), 68% (Gopalakrishnan y col., 2017), 57.4% (Bhatia y col., 2014) y 87% (Tejashwini, 2020), que contrastan con el resultado de este estudio con 19.1%.

En el análisis de regresión logística, el riesgo de diabetes, mediante el cálculo del inverso de la RM, fue 4.1 veces mayor en mujeres que a hombres (IC95% 1.4-12.5). Este resultado contrasta con los referidos por Singh et al (Singh y col., 2019), y Gopalakrishnan et al (Gopalakrishnan y col., 2017), en estudiantes de medicina, que muestran un riesgo significativamente mayor de diabetes en hombres que en mujeres. La respuesta a esta discrepancia de nuestro trabajo con respecto a los estudios de referencia, se encuentra en el resultado de la tabla 2, donde se muestra que el promedio del puntaje de riesgo de diabetes fue mayor para mujeres, con media de 24.8, en relación con los hombres, con media de 18.8.

El análisis del estado civil de los universitarios mostró también el efecto de la edad en el incremento del riesgo de diabetes, ya que los estudiantes casados tuvieron un promedio de edad mayor que los solteros y, aunque en el análisis multivariante se encontró un riesgo de diabetes 8.2 veces mayor en casados que en solteros, la diferencia no fue significativa.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Los alumnos clasificados con obesidad tuvieron un riesgo de diabetes 8 veces mayor que el grupo de referencia (IC95% 1.4-45.7). Se ha documentado que el incremento de la adiposidad corporal representa un factor de riesgo para el desarrollo de diabetes, e inclusive se ha acuñado el término *diabesity* que consiste en la combinación de obesidad y diabetes (Ng y col., 2021). Así que, en población joven, la obesidad tuvo una relacionó significativamente con el riesgo de diabetes, lo cual fue encontrado también por Singh et al (Singh y col., 2019) en estudiantes de medicina.

Por otra parte, el riesgo de diabetes fue 7.8 veces mayor en estudiantes con hipertensión arterial (IC95% 1.2-52.9). Un estudio realizado en población adulta, mayor de 30 años, donde se aplicó el instrumento simplificado de tamizaje, reportó una asociación significativa del riesgo de la enfermedad bajo estudio, entre otros factores, con hipertensión arterial sistólica (Acharya y col., 2017), lo cual apoya conjetura de que la hipertensión arterial está asociada al riesgo de diabetes.

Conclusiones y recomendaciones.

Si bien los estudiantes universitarios han sido clasificados con un riesgo de diabetes bajo o medio, vemos que empiezan a mostrar componentes de la escala de riesgo que lo incrementan, como alta frecuencia de inactividad física y del aumento del perímetro abdominal. Entre los factores no modificables se encuentra la edad que, si bien de momento no tiene una influencia importante en el riesgo de diabetes, se espera que a largo plazo lo llegue a tener. En cambio, los antecedentes hereditarios, presentaron frecuencias bajas, pero junto con otros factores (sexo, obesidad e hipertensión arterial), pueden coadyuvar el desarrollo de diabetes. Finalmente, se recomienda el desarrollo de un modelo de atención integral en salud para universitarios, con un diagnóstico basal y de seguimiento, como el elaborado para la Universidad Nacional Autónoma de México (López y González, 2005).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Referencias bibliográficas

Acharya, A. S., Singh, A., & Dhiman, B. (2017). Assessment of Diabetes Risk in an Adult Population Using Indian Diabetes Risk Score in an Urban Resettlement Colony of Delhi. *The Journal of the Association of Physicians of India*, *65*(3): 46–51.

Anaya, G., & Al-Delaimy, W. K. (2017). Effect of the US-Mexico border region in cardiovascular mortality: ecological time trend analysis of Mexican border and non-border municipalities from 1998 to 2012. BMC public health, 17(1): 400. https://doi.org/10.1186/s12889-017-4332-6

Bhatia, T., Oka, M., Dharamdasani, V., Bhattaccharjee, S., Fortwengel, G., Limaye, V., & Limaye, D. (2014). Type 2 diabetes mellitus: Risk evaluation and advice in undergraduate students in Mumbai. International Journal of Pharmaceutical Science Invention, 3 (4): 37-40.

Craig, C. L., Marshall, A. L., Sjöström, M., Bauman, A. E., Booth, M. L., Ainsworth, B. E., Pratt, M., Ekelund, U., Yngve, A., Sallis, J. F., & Oja, P. (2003). International physical activity questionnaire: 12-country reliability and validity. Medicine and science in sports and exercise, 35(8): 1381–1395. doi.org/10.1249/01.MSS.0000078924.61453.FB

Curtis, A. C. (2015). Defining adolescence. *Journal of Adolescent and Family Health*. [En línea]. 7(2): 1-39. Disponible en: https://scholar.utc.edu/jafh/vol7/iss2/2 Fecha de consulta: 12 de julio de 2022.

García García, J. A., & Cufarfán López, J. (2019). Calidad de vida en estudiantes universitarios con sobrepeso y obesidad: Diferencias por sexo. *Interacciones. Revista de Avances en Psicología, 5*(3), https://doi.org/10.24016/2019.v5n3.195

Gayet, C. (2019). Salud sexual y reproductiva de los jóvenes en México: Problemas persistentes. En: M. L. Coubés, F. J. Uribe Salas y E. D. Vargas Valle (Eds.),

Población y salud en el nuevo escenario fronterizo del norte de México (pp. 173-194). El Colegio de la Frontera Norte.

Gopalakrishnan, S., Rama, R., & Muthulakshmi, M. (2017). Assessing the risk of developing type 2 diabetes mellitus among medical students in Chennai using Indian diabetes risk score. Int J Community Med Public Health, 4(7): 2366-72.

Guerrero-Romero, F., & Rodríguez-Morán, M. (2010). Validación de un instrumento para el tamizaje de casos de diabetes tipo 2 y la vigilancia de personas en riesgo en México. Revista Panamericana de Salud Pública, 27(3): 181-186. https://doi.org/10.1590/s1020-49892010000300005

IPAQ Research Committee. (2004). Guidelines for data processing and analysis of the international physical activity questionnaire (IPAQ). [En línea]. Disponible en: https://www.physio-pedia.com/images/c/c7/Quidelines_for_interpreting_the_IPAQ.pdf Fecha de consulta: 18 de junio de 2022.

Kim, S., & Popkin, B. M. (2006). Commentary: understanding the epidemiology of overweight and obesity--a real global public health concern. International journal of epidemiology, 35(1): 60–67. https://doi.org/10.1093/ije/dyi255

López-Bárcena, J. J., González de Cossío Ortiz, M. G. (2005). Modelo universitario de salud integral, en la Universidad Autónoma de México. Rev Fac Med UNAM, 48 (6): 224-231.

Magallanes Monrreal, M., Gallegos Cabriales, E. C., Carrillo Cervantes, A. L., Sifuentes Leura, D., & Olvera Blanco, M. A. (2010). Sobrepeso, obesidad y dislipidemias en población universitaria del noreste de México. Investigación y Educación en Enfermería, 28(1): 101-107.

Mohan, V., Deepa, R., Deepa, M., Somannavar, S., & Datta, M. (2005). A simplified Indian Diabetes Risk Score for screening for undiagnosed diabetic subjects. The Journal of the Association of Physicians of India, 53: 759–763.

Mongiello, L. L., Freudenberg, N., Jones, H., & Spark, A. (2016). Many College Students Underestimate Diabetes Risk. Journal of allied health, 45(2): 81–86.

Ng, A., Delgado, V., Borlaug, B. A., & Bax, J. J. (2021). Diabesity: the combined burden of obesity and diabetes on heart disease and the role of imaging. Nature reviews. Cardiology, 18(4), 291–304. https://doi.org/10.1038/s41569-020-00465-5

Romero F. Tablas de percentiles de peso, talla y bmi. (2009). Programa para Windows. [En línea]. Disponible en: https://www.ac.uma.es/~felipe/bmi Fecha de Consulta: 12 de julio de 2022

Secretaría de Salud. Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2020. (2021). Sobre Covid-19. Resultados Nacionales. [En línea]. Disponible en: https://ensanut.insp.mx/encuestas/ensanutcontinua2020/doctos/informes/ensanutCovid19ResultadosNacionales.pdf Fecha de consulta: 13 de junio de 2022.

Singh, M. M., Mangla, V., Pangtey, R., & Garg, S. (2019). Risk Assessment of Diabetes Using the Indian Diabetes Risk Score: A Study on Young Medical Students from Northern India. Indian journal of endocrinology and metabolism, 23(1), 86–90. doi.org/10.4103/ijem.IJEM_623_18

Stewart, A., Marfell-Jones, M., Olds, T. and de Ridder, H. (2011). Protocolo internacional para la valoración antropométrica. [En línea]. Disponible en: https://dl-manual.com/download/16-11-27-manual-isak-27-11-16-donx1pnld2vq?hash=f53b7b5b38e819ead82b12ed40930827 Fecha de consulta: 12 de julio de 2022.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 22 de noviembre 2022
Artículo aceptado 12 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tejashwini, V. B. (2020). Evaluation of Risk of Type 2 Diabetes Mellitus in Medical Students Using Indian Diabetes Risk Score (IDRS). International Journal of Physiology, 8 (4): 77-79.

Velázquez-Monroy, O., Lara-Esqueda, A., Martínez-Marroquín, M. Y., & Márquez-Flores, F. (2000). La detección integrada como un instrumento para vincular la prevención primaria, el tratamiento temprano, y la vigilancia epidemiológica en diabetes e hipertensión arterial. Rev Endocrinol Nutr, 8(4): 113-119.

Viner, R. M., Ozer, E. M., Denny, S., Marmot, M., Resnick, M., Fatusi, A., & Currie, C. (2012). Adolescence and the social determinants of health. Lancet, 379(9826): 1641–1652. DOI; https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)60149-4

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Las características personales para el mantenimiento de la actividad física desde el modelo transteórico en psicología de la salud

Personal features for maintenance physical activity through transtheoretical model of health psychology

Alba Serrano-Ceña[1]; Dr. Jose Luis Ybarra Sagarduy[2]

[1]Tecnológico de Monterrey, Escuela Medicina y Ciencias Salud, Avenida Eugenio Garza Sada Sur 2501, CP 64000, Monterrey, Nuevo León, México

[2]Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica de Trabajo Social y Ciencias para el Desarrollo Humano, Avenida Universidad s/n, C.P. 87140, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

Correspondencia para autor: Alba Serrano-Ceña

albaserrano@tec.mx

https://orcid.org/0000-0002-8908-7311

Tecnológico de Monterrey

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

El objetivo del siguiente artículo de divulgación es resaltar los constructos psicológicos como la autoeficacia y el balance decisorio en la iniciación y el mantenimiento de la actividad física. El Modelo Transteórico parte de las etapas para conseguir nuevas conductas a favor de la salud o bien, eliminar comportamientos poco saludables. Sin embargo, desde esta aproximación se considera el riesgo permanente de abandonar las mismas. Por lo tanto, es importante identificar estas variables en los sujetos para realizar una intervención más eficiente que promueva y mantenga la actividad física.

Palabras clave: modelo transteórico, actividad física, autoeficacia, balance decisorio, motivación.

Abstract

The purpose of this review is to emphasis the meaning of psychological constructs such as self-efficacy and decisional balance towards the initiation and maintenance of physical activity. The Transtheoretical Model uses stages of change in order to improve health behaviour or remove not healthy routines. Nevertheless, the model considers the constant risk of withdrawn the actions in favour of health. So, these variables need to be recognized on the subjects as much as possible for making the best intervention to develop and maintain the physical activity.

Keywords: transtheoretical model, physical activity, self-efficacy, decisional balance, motivation.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Introducción

En los últimos cinco años (2018-2021), las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT), en especial las del corazón y cerebrovasculares, han estado entre las diez principales causas de muerte en México. Sin embargo, empeora esta situación en el periodo de enero a junio de 2022 puesto que las enfermedades del corazón se encuentran como primera causa de muerte en el país y las cerebrovasculares en el puesto número seis (INEGI, 2023). Entre los factores de riesgo destacan el sobrepeso y la obesidad, así como la hipertensión esencial (Mostaza y col., 2019).

En consecuencia, las distintas instituciones públicas han promovido potenciar la salud a través de la actividad física (AF) y el ejercicio físico, puesto que se ha referido a nivel mundial que el sedentarismo o la baja AF es un factor de riesgo de mortalidad en ambos géneros (Collaborators, 2020). Por esa razón, el aumento de la AF es la principal estrategia para implementar la reducción de ECNT, dentro de los sistemas de salud de prevención primaria y secundaria, según la Organizacion Mundial de la Salud (OMS, 2019).

Cuando se menciona la AF, se refiere a los movimientos corporales que consumen energía y evitan comportamientos sedentarios. Sin embargo, las actividades planeadas para mejorar la salud como caminar, trotar, montar en bicicleta, practicar deportes u otras que pueden realizarse durante el tiempo de ocio o laboral, se conocen como ejercicio físico. Aunque ambos conceptos difieren en sus características, suelen considerarse similares (Amigo, 2020).

La actividad física (AF) debe tener en cuenta las dimensiones de frecuencia, intensidad y duración para obtener el mejor estado de salud posible, considerando la edad y condiciones como la presencia de ECNT, estado de embarazo o discapacidad. Se sugiere que adultos de 18 a 65 años realicen 150 minutos de actividad moderada (aumentar ritmo cardíaco y respirar más rápido) o 75 minutos por semana de actividad intensa (respirar fuerte y rápido). A los niños y adolescentes se les sugiere 60 minutos de actividades

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

aeróbicas al día, al menos tres veces por semana. El objetivo es reducir o delimitar actividades sedentarias, como pasar tiempo frente a pantallas, realizando cualquier actividad con independencia de la intensidad (OMS, 2020).

La OMS ha desarrollado un plan mundial entre el 2018 al 2030 que tiene como objetivo reducir en un 15% la inactividad física. La meta es conseguir mejoras en los factores de riesgo cardiovascular como el sobrepeso/obesidad, además de impactar sobre otras esferas de bienestar emocional y calidad de vida. Este plan de desarrollo incluye otras disciplinas que permitan crear sociedades, entornos, sistemas y poblaciones más activas (OMS, 2019).

Desde la psicología de la salud se explican distintos modelos que ayudan a predecir los comportamientos saludables o no (Amigo, 2020; Williamson y col., 2021). El modelo transteórico o de etapas de cambio retoma varias teorías de salud y terapias conductuales, identificando procesos y características que permiten el éxito en la consecución y el mantenimiento de conductas a favor de la salud. Glanz y col. (2008) aluden a la importancia del desarrollo de estrategias de mantenimiento, el aumento de hábitos saludables y la ruptura de conductas que no lo son para la promoción de salud. El objetivo de este artículo es mostrar cómo los constructos psicológicos de autoeficacia y balance decisorio fomentan la aparición y el mantenimiento de la actividad física desde el modelo transteórico o de etapas de la psicología de la salud.

Modelo Transteórico

El modelo de salud conocido como modelo transteórico o de etapas de cambio de Prochaska y Di Clemente (Cabrera, 2000) parte de la premisa que para realizar un cambio de conducta hacia un comportamiento saludable se pasa por cinco etapas, las cuales consideran los tiempos y las creencias de los sujetos respecto a las acciones a tomar a favor de la salud (Figura 1). En la primera *etapa de precontemplación*, el sujeto no valora la posibilidad de un cambio o acción a favor de la salud en al menos los próximos seis meses. En la segunda *etapa de contemplación*, el sujeto ha realizado varias acciones de

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

cambio fallidas, aunque hay mayor conciencia de los pros a favor de la salud y un posible cambio en los próximos seis meses. En la *etapa de preparación*, el sujeto tiene intención de realizar cambios en el siguiente mes, incluso, tiene un plan de acción que todavía no ha ejecutado, aunque haya podido realizar algunos. En la *etapa de acción*, el sujeto ha realizado acciones o modificaciones observables en su estilo de vida en los últimos seis meses que son suficientes para disminuir el riesgo de enfermedades. Al final, en la *etapa de mantenimiento*, el sujeto mantiene los cambios realizados en la etapa anterior y trabaja para mantenerlos, además que, muestra mayor confianza en él/ella misma para continuar con ellos (Glanz y col., 2008; Williamson y col., 2021).

Además, el modelo transteórico o de etapas de cambio considera la premisa de que cada sujeto presenta unas características motivacionales y otras de intención de cambio. Estas permiten avanzar de una etapa a otra hasta conseguir el hábito saludable y mantenerlo. Las características motivacionales y las de intención refieren a los siguientes constructos psicológicos: el balance decisorio, la tentación, la autoeficacia y, los procesos de cambio. Estos se asocian con el mantenimiento y el compromiso del cambio hacia el hábito saludable.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Figura 1. *Modelo transteórico*

Fuente: *elaboración propia*

Constructos psicológicos

Una revisión sistemática desde el modelo transteórico, en la mejora de la AF, mostró que más que discriminar las intervenciones según la etapa en el que se encuentra el sujeto, se deberían de identificar los constructos individuales. Estos son los que favorecen resultados más prometedores en el inicio y/o en el mantenimiento de comportamientos a favor de la salud. Aquellas intervenciones en las que se consideraron, al menos, tres de los constructos psicológicos del modelo para generar un cambio en la conducta, se incrementó por tres veces la consecución de acciones a favor de la AF. En especial, se había mejores resultados en la etapa de acción cuando se consideraban dentro de la intervención los constructos de autoeficacia y de procesos de cambio (Romain y col., 2018).

La autoeficacia se refiere a la creencia sobre la capacidad de uno mismo de superar una dificultad para hacer algo, como pueden ser hábitos que puedan promover la buena salud

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

cardiovascular (Glanz y col., 2008). Este constructo es un buen predictor de aquellas personas que van a iniciar cualquier AF y se ha asociado también a la pérdida de peso. Por lo tanto, identificar y trabajar la creencia que tiene el sujeto de cómo y qué tanto puede superar los obstáculos en la iniciación de una AF, resultará en mayores probabilidades de éxito y mantenimiento (Williamson y col., 2021) .

En cuanto al constructo de autoeficacia, se realizó un estudio para valorar su relación con el ejercicio físico a través de una intervención de implementación de hábitos saludables a tres grupos de adultos con síndrome metabólico. Los sujetos se dividieron en grupo control, grupo con intervención cognitivo conductual y grupo con una intervención psicoeducativa (Garcia-Silva y col., 2018). Los resultados mostraron que la autoeficacia se relaciona con el malestar psicológico y los cambios de rutina, los cuales tienen relación con variables psicológicas como asertividad, estrés percibido e ira, antes que el malestar físico y otras ocupaciones. Por lo tanto, estos resultados sugieren que las propuestas de intervención enfocadas en la autoeficacia consideren la autorregulación de la AF, la reducción del estrés y el fortalecimiento de relaciones interpersonales (Garcia-Silva y col., 2018).

Otro de los constructos motivacionales dentro del modelo transteórico es el balance decisional o el balance decisorio. Este último se conoce como la creencia que tienen los sujetos sobre los pros y contras de realizar una conducta (Glanz y col., 2008). Este constructo nos permite conocer en qué momento el sujeto está más cercano a iniciar un cambio de comportamiento, por lo que se asocia a la etapa de contemplación, cuando hay una mayor creencia sobre los pros de realizar una conducta saludable. Por otro lado, se ha visto su relación con las últimas etapas de acción y mantenimiento. Un ejemplo de ello es un estudio realizado a alumnos de preparatoria para conocer la relación entre la AF y el balance decisorio. Los resultados mostraron que este constructo tenía más peso en la etapa de mantenimiento en los jóvenes que realizaban más AF, por lo tanto reforzaba el sostenimiento de la conducta e incluso, el aumento del ejercicio (Zamarripa y col., 2019).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

En lo que respecta a la población joven, se ha referido desde la OMS, (2020) que más del 80% de los adolescentes entre 11 y 17 años muestran menor AF que la recomendada, es decir, realizan menos de 60 minutos de ejercicio al día. El estilo de vida sedentario en esta población es perjudicial para su salud física, por lo que se proponen políticas que motiven e incentiven la AF dentro de las espacios públicos y educativos (Garwoord & Lindmeier, 2019).

No obstante, resulta interesante las observaciones sobre los constructos motivacionales dentro del modelo transteórico, en especial porque se considera que los cambios de conducta hacia hábitos saludables son propensos a su abandono, incluso cuando ha ocurrido un mantenimiento del mismo hábito (Cabrera, 2000).

Aunque el modelo transteórico valora la dificultad de explicar un cambio de comportamiento desde un único modelo, en la literatura se refiere que realizar intervenciones basándose en una única teoría reporta un mayor incremento en la AF que intervenciones que parten de dos o más teorías o modelos de salud (Gourlan y col., 2015).

De hecho, desde el modelo de creencias de la salud, se consideran que las barreras ambientales afectan a la realización de AF en personas con menos recursos. Puesto que existen menos posibilidades de transporte, equipamiento o espacios urbanos que favorecen el ejercicio físico. Y además, en relación con barreras sociodemográficas, un estudio realizado en Estados Unidos mostró que la población con menores recursos, en las que se incluye la población indígena, negra o latina, tienen mayor inactividad física que los hombres blancos de Estado Unidos y Canadá, por lo que se promueven programas de ejercicio en casa para compensar la falta de espacio público e incrementar su buen estado de salud (Williamson y col., 2021).

Conclusiones

La actividad física es un factor protector en la aparición de ECNT, y en específico de enfermedades del corazón y cerebrovasculares. La creación de distintos programas para

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

la disminución del sedentarismo favorece la disminución de factores de riesgo como el sobrepeso/obesidad y la presión arterial. Para valorar la capacidad de éxito de la población en la aparición de conductas saludables y el sostenimiento de estas, se deben considerar los constructos de autoeficacia y balance decisorio que refiere el modelo transteórico. Con independencia de la etapa en la que se encuentre el sujeto, estas características individuales deben ser identificadas por el profesional pertinente, ya que influyen en el constante riesgo de abandono de la actividad física. Por lo tanto, los atributos personales de autoeficacia y balance decisorio fomentan y cuidan la aparición de las conductas saludables y el mantenimiento de esta, fomentando el éxito de la salud en el sujeto.

Referencias

Amigo, I. (2020). *Manual de Psicología de la Salud*. Pirámide.

Cabrera, G. A. (2000). El modelo transteórico del comportamiento en salud The transtheoretical model of health behavior. *Publicado En La Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, *18*(2): 129–138.

Collaborators, G. 2019 R. F. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*, *396*, 1223–1249. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30752-2

Garcia-Silva, J., Peralta-Ramírez, M. I., Navarrete, N., Silva-Silva, D., & Caballo, V. E. (2018). Validez y fiabilidad de la escala de autoeficacia para el ejercicio físico en pacientes con síndrome metabólico. *Revista Española de Salud Pública*, *92*, 1–12.

Garwoord & Lindmeier (2019). Majority of Adolescents Worldwide Not Sufficiently Physically Active, Says WHO, en *The Global heath and Fitness Association.* [En línea]. Disponible en: https://www.ihrsa.org/about/media-center/press-releases/majority-of-adolescents-worldwide-not-sufficiently-physically-active-says-who/

Glanz, K., Rimer, B.K. & Viswanath, K. (2008). The transtheoretical model and stages of change. En *Health Behaviour and Health Education: Theory, Research and Practice* (pp. 97-121).

Gourlan, M., Bernard, P., Bortolon, C., Romain, A.J., Lareyre, O. & Carayol, M. (2015). Efficacy of theory-based interventions to promote physical activity. A meta-analysis of randomised controlled trials. Health Psychol Review. 10(1), 50-66. doi:

10.1080/17437199.2014.981777

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Estadísticas de defunciones registradas, enero-junio 2021, en *INEGI*. [En línea].Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=7104. Fecha de consulta: 5 de Mayo de 2022

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023). Estadísticas de defunciones registradas, enero-junio 2023, en INEGI. [En línea]. Diponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/DR/DR-Ene-jun2022.pdf. Fecha de consulta: 5 de Febrero de 2023

Mostaza, J. M., Pintó, X., Armario, P., Masana, L., Ascaso, J. F., Valdivielso, P., Arrobas Velilla, T., Unidad de Lípidos, Á. B., Calmarza, P., Cebollada, J., Civeira, F., Cuende Melero, J. I., Salan, M. E., Fernández Pardo, J., Godoy, D., Guijarro, C., Jericó, C., Laclaustra, M., Rallo, C. L., … Vila, L. (2019). Standards for global cardiovascular risk management arteriosclerosis. *Clinica e Investigacion En Arteriosclerosis*, *31*, 1–43. https://doi.org/10.1016/j.arteri.2019.03.004

OMS, Organizacion Mundial de la Salud. (2019). Plan de acción mundial sobre actividad física 2018-2030: personas más activas para un mundo más sano, en *Organización Mundial de la Salud.* [En línea].Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/327897/WHO-NMH-PND-18.5-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Fecha de consulta: 6 de Abril de 2020

OMS, Organización Mundial de la Salud (2020). Directrices de la OMS sobre actividad física y hábitos sedentarios: de un vistazo. Ginebra, en *Organización Mundial de la Salud.* [En línea].Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/336656/9789240015128-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Fecha de consulta: 6 de Abril de 2020

Romain, A. J., Bortolon, C., Gourlan, M., Carayol, M., Decker, E., Lareyre, O., Ninot, G., Boiché, J., & Bernard, P. (2018). Matched or nonmatched interventions based on the transtheoretical model to promote physical activity. A meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Sport and Health Science*, *7*(1), 50–57. https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.10.007

Williamson, T. M., Moran, C., McLennan, A., Seidel, S., Ma, P. P., Koerner, M. L., & Campbell,

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 2 octubre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

T. S. (2021). Promoting adherence to physical activity among individuals with cardiovascular disease using behavioral counseling: A theory and research-based primer for health care professionals. *Progress in Cardiovascular Diseases*, *64*, 41–54. https://doi.org/10.1016/j.pcad.2020.12.007

Zamarripa, Jorge, Ruiz-Juan, Francisco, & Ruiz-Risueño Abad, Jorge Ricardo. (2019). El balance decisional, etapas de cambio y nivel de actividad física en estudiantes de bachillerato. Andamios, 16(39), 379-401. https://doi.org/10.29092/uacm.v16i39.688

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

"Ozono para el tratamiento de aguas residuales."

"Ozone for wastewater treatment."

Vicente Daniel Treviño-Rodríguez[1], Ma. de Jesús Soria-Aguilar[1], Francisco Raúl Carrillo-Pedroza[1], Elsa Nadia Aguilera Gonzalez[2], Marco Antonio Sánchez Castillo[2].

Autor de correspondencia: Vicente Daniel Treviño Rodriguez,
vicentetrevino@uadec.edu.mx
Orcid 0000-0001-6174-8993

[1]Facultad de Metalurgia Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Norte, Carretera 57 Km 5, Los Bosques, 25710 Monclova, Coahuila.

[2]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. Venustiano Carranza 935, República, 25280 Saltillo, Coahuila, México.

[3]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, Martínez #6, Av. Dr. Manuel Nava, Zona Universitaria, 78210 San Luis Potosí, México.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

En los últimos años el ozono ha sido utilizado con más frecuencia para el tratamiento de aguas residuales como agente desinfectante, debido a su alto poder oxidante. Dada la presencia de nuevos contaminantes más difíciles de remover, descomponer u oxidar, el ozono se ha combinado con otros agentes oxidantes y/o materiales que fungen como catalizadores para la generación de radicales más oxidantes. Actualmente, la literatura especializada permite conocer información sobre los tratamientos más utilizados con la aplicación de ozono, por lo tanto, en el presente trabajo se hace una revisión de la información más reciente con respecto al ozono aplicado en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales industriales. Los temas que se trataran son las generalidades del ozono, sus ventajas y riesgos, su toxicidad, además los tipos de aguas residuales y los componentes de estas. Así como los tratamientos o métodos que usan ozono, tanto de manera individual como las combinaciones con otros reactivos y catalizadores.

Palabras clave: Ozono, aguas residuales, tratamiento.

Abstract

In recent years, ozone has been used more frequently for wastewater treatment as a disinfectant agent, due to its high oxidizing power. Given the presence of new contaminants that are more difficult to remove, decompose or oxidize, ozone has been combined with other oxidizing agents and/or materials that act as catalysts for the generation of more oxidizing radicals. Currently, the specialized literature provides information on the most widely used treatments with the application of ozone, therefore, in the present work a review of the most recent information regarding ozone applied in the treatment of different types of industrial wastewater is made. The topics to be covered are the generalities of ozone, its advantages and risks, its toxicity, as well as the types of wastewaters and their components. As well as the treatments or methods that use ozone, both individually and in combination with other reagents and catalysts.

Keyword: Ozone, wastewater, treatment.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

1. Introducción

En la actualidad, uno los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad es el creciente aumento de la escasez del agua. Por lo que se requiere un enfoque global con respecto al uso y contaminación de este vital líquido, ya que la mayoría de las actividades diarias realizadas por el ser humano generan este tipo de problemas y los filtros naturales no cuentan con la capacidad necesaria para la eliminación de los contaminantes presentes en los vertidos.

Una medida que puede ayudar a contrarrestar tanto la contaminación como el uso excesivo de este recurso es el tratamiento o reutilización de recursos hídricos, recuperando el agua contaminada por medio de diversos métodos o sistemas que la hagan apta para uso tanto en la industria o para el consumo de los seres vivos. Todos estos procesos necesitan contar con un agente que sea capaz de eliminar los contaminantes que contienen estas aguas para su potabilización y recuperación.

El ozono, es utilizado como un potente y eficaz desinfectante para el tratamiento de aguas, tanto que puede ser usado en la potabilización o en la eliminación de compuestos nocivos de aguas provenientes de la industria gracias a su alto poder oxidante.

2. Ozono

Es un gas que se encuentra presente en la atmosfera a precisión y temperatura ambiente, puede ser incoloro o azul, con un olor parecido al azufre incluso a bajas concentraciones (Pohanish, 2017); está constituido de tres átomos de oxígeno (Figura 1). El ozono se forma de manera natural por la reacción del oxígeno (O_2) con oxigeno elemental (O) proveniente de la desintegración del oxígeno por radiación UV y tormentas eléctricas (Pohanish, 2017; Gad, 2014).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

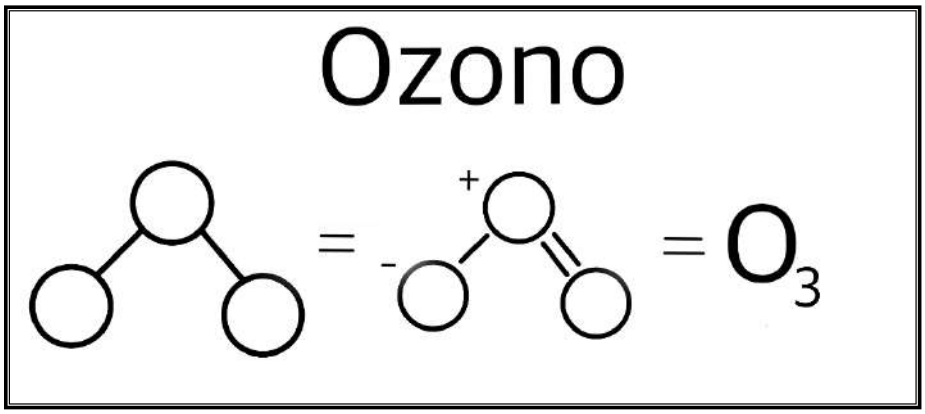


Figura 1. Estructura del ozono, fuentes: elaboración propia

Este gas es conocido principalmente por su función como protector ante la radiación ultravioleta proveniente del sol hacia el planeta; aunque por su propia naturaleza es un compuesto altamente oxidante, por lo que es utilizado como un potente oxidante y desinfectante en una amplia cantidad de actividades, donde destacada la descomposición de contaminantes en el agua. Puede eliminar los malos olores y no deja residuos químicos como puede ocurrir con otros desinfectantes ya que este se descompone con facilidad en presencia de radiación solar, calor y otras cusas formando oxígeno (Takeuchi, 2005; Askenaizer, 2002).

2.1 Datos generales del ozono

El ozono como cualquier elemento o compuesto, tienen sus características y propiedades que lo caracterizan, las cuales sen encuentran englobadas en la Tabla 1:

Tabla 1. Datos generales del ozono (adaptada de Ozone Solutions, 2021).

Producto/material	Ozono
Fórmula molecular	O_3
Característica principal	Gas oxidante – CAS no. 10028-15-6 / EG no. 233-069-2
Masa molecular	48.0

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Producción	Efecto corona
Concentración	Hasta el 18 % en peso en aire enriquecido con oxígeno/oxígeno
Punto de ebullición	-111.0°C
Punto de fusión	-192.7°C
Solubilidad en el agua por peso (a 20°C)	570 mg/L
Densidad del vapor	1.6 (1 = aire)
Inflamabilidad	No es inflamable/apoya vigorosamente la combustión
Punto de ignición	No aplica
Temperatura de autoignición	No aplica

2.2 Ventajas y riesgos.

El ozono presenta una gran cantidad de ventajas entre las cuales destacan los costos bajos que representa su uso a largo plazo, por su vida útil y eficiencia energética, es un material liviano y es de gran confiabilidad. Pero también presenta algunos riesgos su uso como irritación, daño ocular, afecta a las vías respiratorias, también presenta la posibilidad de reaccionar con sustancias inflamables al igual que puede producir reacciones químicas peligrosas al reaccionar con productos químicos, en cuestión económica la inversión principal puede llegar a ser alta ya que depende del precio del ozono en el país donde se utilizará (García, 2020; Ozonotecnia, 2019).

3. Toxicología

La organización mundial de la salud en el año 2005 estableció: que cuando las concentraciones de ozono son superiores a 240 µg/m^3 en un periodo de ocho horas pueden existir repercusiones hacia la salud (OMS, 2005). En el ambiente los niveles seguros de

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

ozono que se deben encontrar en el ambiente están en torno a 0.12 ppm de ozono, pero para la realización de una desinfección se requieren niveles hasta 100 veces superiores (García, 2020).

En cuanto a la exposición a largo plazos, el ozono es considerado como un agente radiomimético; es decir, los efectos que estos presentan son comparados con la exposición a los largos periodos de tiempo a la luz solar. Estos efectos serian resequedad y el envejecimiento de los tejidos a los que estuvo expuesto, aunque no es considerado como carcinógeno.

4. Aguas Residuales

Estas son aguas que contienen impurezas ya sean sólidos o disueltas en ella. El origen de estas aguas puede ser de diferentes vertederos, ya sean domésticos e industriales que son las principales fuentes de origen, así como las aguas dentro de la naturaleza que hayan estado en contacto con las anteriores (Fundación ECOMAR, 2020; Liu y Liptak, 2000).

4.1 Análisis de las aguas residuales

Previo a su tratamiento, a las aguas residuales se les realizan tres tipos análisis, los cuales corresponden a los tipos de componentes que se encuentran presentes: (Fundación ECOMAR, 2020; Thai Parkerizing, 2022).

- Físicos: Esta basada principalmente en la observación de las características del agua, este inicia con una observación directa de la fuente del agua, olfatear la fuente y tomar una muestra para observar el color, olor, sólidos presentes y la temperatura de las aguas, aunque analizar directamente de la fuente es la forma con la que se obtiene un mejor resultado.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

• Químicos: Un análisis común para la calidad del agua, es por medio de la adición de químicos utilizando un kit de pruebas químicas en una muestra de agua previamente recolectada de la fuente, estos químicos reaccionan con el agua causando un cambio en la coloración del agua la cual es comparada con la carta de colores dentro del kit; determinando de esta forma el pH del agua. Además la muestra puede ser llevada a laboratorio para analizar propiedades del agua; como los sólidos totales, los sólidos totales disueltos. Los más comunes son de origen orgánico (carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, compuestos orgánicos volátiles,); los inorgánicos (alcalinidad, cloruros, metales pesados, nitrógeno, PH, fósforo, contaminantes prioritarios y azufre); gases (sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno).

• Biológicos: La finalidad de este análisis es comprobar la presencia de bacterias y cantos grupos específicos de bacterias en el agua, para esto se realizan análisis a fondo, donde se anota paso a paso la fecha y hora de toma de la muestra durante el procedimiento de calidad de agua para obtener los resultados más precisos y detallados Los más habituales en estas aguas son animales y plantas muertas.

5. Tratamiento de agua residuales

Son procesos que tienen como finalidad la eliminación de contaminantes presentes en el agua, estos procesos dependen del tipo de contaminante presente será el proceso que empleará (USGS, 2018). Entre los diversos tipos de tratamientos de aguas residuales se clasifican en tratamientos físicos, químicos y biológicos, de los cuales tienen que pasar por diversas etapas para lograr su objetivo. (Akansha y col., 2021).

Rodríguez de Jorge menciona que estas tres clasificaciones de tratamientos tienen diversos de procesos característicos, al igual que el tipo de contaminante al que va dirigido; todo esto se puede observar en la Tabla 2:

Tabla 2: Tipos de tratamientos de aguas residuales (basado en Rodríguez de Jorge, 2020).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tipo	Descripción	Procesos
Físicos	Se aplica una separación física (sólidos).	Tamizado, precipitación, separación y filtración de sólidos.
Químicos	Depende de las propiedades químicas del contaminante o reactivo incorporado al agua.	Eliminación del hierro y del oxígeno, eliminación de fosfatos y nitratos, coagulación, procesos electroquímicos, oxidación, intercambio de iones.
Biológicos	Pretende eliminar los contaminantes coloidales.	Lodos activos, filtros percoladores, biodigestión anaerobia, lagunas aireadas

5.1 Etapas

Los tratamientos de aguas residuales están divididos en diversa fase, pero las más comunes: (Akansha y col., 2021; Fibras & normas de Colombia, 2018).

• Fase 1: Tratamiento mecánico de las aguas: En esta fase se elimina alrededor de un 20- 30% de los sólidos, este se realiza por medio de rejillas o tamices giratorios de diferentes aberturas para lograr eliminar la mayor cantidad de impurezas sólidas; todas estas impurezas se recuperan se dejan secar para una posterior calcinación.

• Fase 2: Depuración biológica: Esta fase consiste en colocar las aguas en áreas ventiladas donde pueda ocurrir la generación de microorganismos y baterías que se alimentan de los contaminantes orgánicos aun presentes en el agua y los convierten en otras sustancias inorgánicas (lodos o fangos), los cuales se vierten retirando el agua ya depurada.

• Fase 3: Tratamiento químico de aguas y aguas residuales: Tiene como finalidad la depuración de las aguas por medio de procesos químicos para alcanzar los valores estándar establecidos, algunos de los tratamientos pueden ser:

- Neutralización: Uso de ácidos o bases para estabilizar o lograr lo niveles de pH que se necesitan.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

- Desinfección: Agregando cloro o dióxido cloro se eliminan los organismos patógenos, una alternativa es el uso de la luz ultravioleta y un producto químico, pero se usa con menor frecuencia
- Precipitación de fosfatos: Este va enfocado a las aguas contaminadas con fosfatos provenientes de detergentes, fertilizantes y heces, estos son eliminados con procesos de precipitación y flotación.
- Eliminación de nitrógeno: Consiste en agregar microorganismos anaerobios para descomponer los nitratos que formaron gracias al amonio, estos nitratos se descomponen en gas nitrógeno que se disuelve en la atmósfera.
- Desferrización: Para la reducción de los contenidos de hierro en las aguas se utilizan sosa caustica y oxígeno.
- Desmanganización: Al igual que la reducción de hierro se utiliza oxígeno para la reducción de manganeso, al descomponer hidrogenocarbonato de manganeso que se puede encontrar en las aguas residuales.

5.2 Tratamientos con ozono

Son procesos que ofrecen la posibilidad de reducir o eliminar por completo todos los microorganismos, además de ser una forma económica de purificación del agua. Es considerada como una de las mejores opciones gracias al gran poder oxidante que tiene el ozono. El ozono es más eficaz que la utilización del cloro por su capacidad de eliminar de forma más activa los contaminantes, además de que el cloro es un compuesto que afecta el pH del agua y puede generar compuestos nocivos al medio ambiente y seres vivos (Joseph y col., 2021).

Este tratamiento tiene un gran campo de aplicación en los que destacan la agricultura, la desinfección de alimentos, aguas residuales, potabilización del agua y el riego; aunque también tiene otras aplicaciones en las lavanderías industriales, limpieza y desinfección de balnearios, piscinas y spas (Eurozon, 2021).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

6. Trabajos relacionados.

A lo largo de historia una gran cantidad de investigadores ha realizado trabajos utilizando ozono para tratar las aguas residuales de distintos orígenes en los que se pude destacar la industria textil, las aguas residuales de procesos de extracción de minerales como la cianuración, la desinfección de agua para consumo entre otras. A continuación, se describirán algunas de las investigaciones más actuales de este tema:

Para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil en el año 2020, se efectuó un postratamiento a escala laboratorio basado en ozono; donde utilizaron un reactor para colocar la solución con capacidad aproximada de dos litros, se aplicaron dosis de ozono de 0.05 y 0.5 g/min, la experimentación genero residuos los cuales se vertieron en una solución de yoduro de potasio de manera preventiva para evitar la formación de otros compuestos dañinos. En este trabajo llegaron a tres conclusiones, una de ellas es utilizando ozono como postratamiento para eliminar

impurezas residuales mejora la calidad del agua, la coloración que pude llegar a presentarse fue reducida; ya que se mostró un decrecimiento en espectro de absorbancia y otros compuesto o parámetros mostrados en estas aguas como el fenol y el amoniaco total, fueron eliminados un 30.8% y 62% respectivamente (Suryawan y col., 2020).

En 2019 Ding y colaboradores realizaron una investigación acerca de la desinfección utilizando ozono de agua de consumo proveniente de la purificación de agua utilizado cloro como desinfectante, ya que se notó que en este proceso ha llevado a la formación de bacterias resistentes al cloro; lo que representa un problema para el ser humano.

Uno de los objetivos de este estudio fue explorar las características fisiológicas y bioquímicas y la influencia que tiene en el ambiente como el pH y la temperatura, la pruebas se realizaron a siete cepas de bacterias resistentes al cloro del agua potable. La desinfección con ozono fue utilizada para investigar el efecto de inactivación de las baterías y esporas presentes; para

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

determinar su mecanismo de activación inactivación fueron escaneadas por microscopia de electrones.

La resistencia de las bacterias fue más baja a comparación de las esporas a una concentración de ozono de 1.5 mg/L, donde el 99.99% fueron desactivadas por el incremento de la concentración de ozono y la duración del tratamiento, el ozono fue producido por un generador de ozono (Ding y col., 2019).

Otro trabajo relacionado con la utilización de ozono en el tratamiento de aguas residuales fue el realizado por Gulde y colaboradores en el año 2021. Este estudio está enfocado en la oxidación de microcontaminantes durante la ozonación de una planta piloto de agua potable seguida de una filtración biológica con arena.

Durante el proceso de ozonación se detectaron alrededor de 227 productos de transformación provenientes de 39 de los 51 microcontaminantes después de un proceso de cromatografía para la extracción de sólidos. Para la formación de productos de transformación se realizaron mediante la combinación de la cinética de la formación de radicales hidroxilos y la formación de ozono.

Mediante procedimientos analíticos se pudo diferenciar los productos de transformación que se formaron como productos primarios por la oxidación con ozono, aunque hubo algunos que se esperaran que se formaran, pero no lo hicieron. Durante la filtración con arenas se redujeron 187

productos de transformación. La ozonación se realizó en 4 reactores con un volumen de 2.2 metros cúbicos a una transferencia de ozono de 1 mg/L (Gulde y col., 2021).

6.1. Industria metalúrgica

En cuanto las aguas residuales provenientes de la industria metalúrgica; son principalmente debido a sus procesos de extracción, un ejemplo de ellos es el proceso de cianuración el cual es uno de los más utilizados para la extracción de metales precisos como el oro, la plata o las aleaciones de estos. Las aguas residuales de este proceso al igual que las de los diversos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

procesos u orígenes antes mencionados presentan las mismas dificultades como los son el manejo, descarga y su tratamiento; ya que estas aguas pueden formar compuestos nocivos para el ser humano y el ambiente.

Entre los trabajos que se mencionaran a continuación, se destaca el uso del ozono como agente oxidante principal y su combinación con otro agente oxidante como los es el peróxido de hidrogeno y el uso de un catalizador al combinar estos procesos.

Martino y colaboradores, realizaron una prueba piloto de la eliminación de cianuro utilizando solamente ozono con aguas de lavado de alto horno. Donde realizaron dos pruebas una donde se inyectaba en ozono de forma continua y la segunda se realizaba en lotes de 4-5 horas, obtuvieron como resultados que la prueba que se realizó en lotes la eliminación de cianuro fue mayor que en la continua debido a las limitaciones que presentaba la prueba y que para para obtener una mayor eliminación se requiere más tiempo e inyección de ozono para lógrala (Martino y col., 2018).

En cuanto a la combinación de dos procesos de oxidación Pueyo y colaboradores compararon la eficiencia del proceso de ozonación y la combinación de este con peróxido de hidrogeno en aguas residuales del proceso de coquización. Este caso concluyó que la remoción de cianuro no aumento con la combinación de ozono con peróxido de hidrogeno (90%); aunque si aumenta si se realiza un tratamiento previo los que dieron mejores resultados fueron la coagulación-floculación-decantación y ablandamiento con Lime Soda Ash Softening (hidróxido de calcio y carbonato de sodio) (Pueyo y col., 2016).

Además de la combinación de agentes oxidantes, también se ha estudiado el uso de catalizadores, donde Morillo y colaboradores realizaron una comparación del uso del ozono-peróxido de hidrogeno- carbón activado la remover el cianuro de aguas residuales. En el cual evaluaron el comportamiento por separado y la combinación de estos , se midió principalmente la concentración de cianuro y consumo de ozono después de cada prueba, también la concentración de cianuro se usó en varios pH, cuidando que no se formaran compuestos peligrosos y obtuvieron como resultados que la reducción de cianuro con un pH

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

de 11 fue la de mejores resultados en todos los casos, al igual concluyeron que la remoción fue mayor añadiendo peróxido de hidrogeno en una razón de 10 mg H_2O_2 /mg O_3 y que el uso de carbón activado no mostro una mejoría; ya que la mayor remoción resulto de la combinación de peróxido de hidrogeno con ozono (Morillo y col., 2018).

6.2. Uso de catalizadores

En la actualidad se ha estudiado es uso de catalizadores y/o minerales con una cierta porosidad, para acelerar la reacción o que estos absorban los en mayor cantidad los contaminantes dentro de las aguas. Uno de los trabajos más recientes fue el realizado por Wang y colaboradores en el año 2022, donde utilizaron ferrato de potasio para mejorar el tratamiento de aguas con ozono provenientes de la industria farmacéutica; compararon el uso combinado del ferrato de potasio y ozono con el ozono solamente, también el efecto de la reducción de los productos de ferrato de potasio en la descomposición con ozono, la influencia del orden de implantación de los tratamientos y observar si los productos de ferrato de potasio actúan como catalizador; la cual obtuvo resultados positivos por lo que es una posibilidad su uso combinado con el ozono, ya que los productos de este ferrato de potasio catalizan la ozonación al acelerar la descomposición del ozono en radicales libres de oxígeno; por lo tanto , los productos de ferrato de potasio mejoran la eficacia del tratamiento de las aguas residuales de la industria farmacéutica (Wang y col., 2021).

Otro trabajo que se realizó con catalizadores fue el de Slipko y colaboradores en el 2022, En que emplearon el carbón activado en forma de filtro durante el proceso de ozonación en un estudio piloto a largo plazo; se utilizaron tres reactores de ozono con un volumen de 12 m^3 , la dosis aplicada de ozono fue de 0.55 g O_3/g; donde el consumo de la oxidación fue de 3.43 g O_3/g. Dando como resultado que se requirieron dosis de ozono $\geq$ 0.6 g O_3/g de carbón orgánico disuelto para afectar el ADN de los objetivos que eran antibióticos de baterías y gérmenes (Slipko y col., 2022).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

7. Conclusión

Como se menciona con anterioridad el principal problema que presentan todos los procesos que generan aguas residuales son el control de estas debido a los compuestos que se pueden formar con la interacción directa al agua u otros elementos presente dentro de esta, por lo que el ozono gracias a su gran efectividad para eliminar una gran cantidad de compuesto es una gran alternativa, además de que se puede combinar con otros agentes oxidantes o incluso catalizadores, los cuales ayudarían a eliminar compuestos más difíciles de remover.

Referencias

Akansha, K., Majumber, S., Misra, M. & Ghosh-Sachan, S. (2021). Chapter 4: Role of microorganisms in performance of wastewater treatment plants. In Elsevier (Ed.), *Wastewater treatment cutting-edge molecular tools, techniques and applied aspects.* [En línea]. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=udPbDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2022

Askenaizer, D. (2003). Drinking water quality and treatment. In Academic press (Eds.), *Encyclopedia of physical science and technology* 3: 651-671. San Diego, Estados Unidos de America.

Ding, W., Jin, W., Cao, S., Zhou, X., Wang, C., Jiang, Q., Huang, H., Tu, R., Han, S.F. & Wang, Q. (2019). Ozone disinfection of chlorine-resistant bacteria in drinking water. *Water Research.* 160: 339-349.

Eurozon (2021). Tratamiento de agua con ozono, en *eurozon.com.* [En Línea]. Disponible en: https://eurozon.com/tratamiento-agua-ozono/. Fecha de consulta:20 de septiembre de 2022.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Fibras & normas de Colombia S.A.S (2018). Estas son las etapas del proceso de tratamiento de aguas residuales, en *Blog fibras y normas de Colombia*. [En Línea]. Disponible en: https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/etapas-del-proceso-tratamiento-aguas-residuales/. Fecha de consulta: 22 de septiembre 2022.

Fundación ECOMAR (2020). ¿Qué son las aguas residuales?, en *fundacionecomar.org* [En Línea]. Disponible en: https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/. Fecha de consulta 18 de septiembre 2022

Gad, S.C. (2014). Ozone. Encyclopedia of toxicology (Third Edition). *Academic press (Eds.)*: 747-750.

García, B. (2020). No te fíes: estos son los riesgos de desinfectar con ozono "casero". *En El Mundo.* Disponible en: elmundo.es/ciencia-y-salud/salud/2020/05/17/5ec0088721efa0ae5f8b4572.html. Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2022

Gulde, R., Clerc, B., Rutsch, M, Helbing, J., Salhi, E., McArdell, C. S. & von Gunten, U. (2021).Oxidation of 51 micropollutants during drinking water ozonation: Formation of transformation products and their fate during biological post-filtration. *Water Research.* 207: 117812.

Joseph, C.G., farm, Y., Taufiq-Yap, Y., Pang, C.K., Nga J.L.H. & Li Puma, G. Filip A. (2021). Ozonation treatment processes for the remediation of detergent wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9 (5): 106099.

Liu D.H.F. & Liptak B.G. (2000). *Water treatment.* (Primer edición). Estados Unidos de América: Ed. Taylor & Francis. 5 pp.

Martino, I., Colla, V. & Branca T.A. (2018). Extension of pilot test of cyanide elimination by ozone from blast furnace gas washing water through Aspen Plus® based model. *Frontiers of chemical science and engineering.* 12 (4): 718-730.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 10 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Morillo Esparza, J., Cevallos Cueva, N., Sandoval Pauker, C., Vargas Jentzsch, P. & Muñoz Biseti, F. (2018). Combined treatment using ozone for cyanide removal form wastewater: A comparison. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 35 (2):459-467

OMS, Organización mundial de la salud (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, en *WHO publications.* [En Línea]. Disponible en: http://apps.who.int /iris/bitstream/handle/10665/69478/ WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1. Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2022

Ozone solutions (2021). Material safety data sheet for ozone, *en ozone solutions.* [En línea]. Disponible en: https://ozonesolutions.com/blog/material-safety-data-sheet-for-ozone/. Fecha de consulta: 5 de septiembre de 2022.

Ozonotecnia (2019). Características del ozono, en o*zonotecnia*. [En Línea]. Disponible en: https://www.ozonotecnia.cl/caracteristicas-del-ozono/#. Fecha de consulta 8 de septiembre 2022.

Pohanish, R.P. (2017). O, Sitting´s Handbook of toxic and hazardous chemicals and carcinogens (Seventh Edition). *William Andrew Publishing (Eds.):* 2439-2482.

Pueyo, N., Miguel, N. Ovelleiro, J.L. & Ormad, M.P. (2016). Limitations of the removal of cyanide from cooking wastewater by ozonation and by the hydrogen peroxide ozone process. Water Science & Technology. 74 (2): 82-90.

Rodríguez de Jorge, L. (2020). El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminacion de contaminantes emergentes, España, en iagua.es [En línea]. Disponible en: www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes. Fecha de consulta: 2 de octubre de 2022.

Slipko, K., Reif, D., Schaar, H., Saracevic, E., Klinger, A., Wallmann, L., Krampe, J., Woegerbauer, M., Hufnagl, P. & Kreuzinger, N. (2022).Advanced wastewater treatment with

ozonation and granular activated carbon filtration: Inactivation of antibiotic resistance targets in long-term pilot study. *SSRN product & services.* 438:129396.

Suryawan, I.W.K., Helmy, Q.& Notodarmojo, S. (2020). Laboratory scale ozone-based post-treatment from textile wastewater treatment plant effluent for water reuse. *Journal of physics conference series.* 1456: 012002.

Thai parkerizing. (2022). The importance of wastewater analysis, Thailandia , en thaiparker.co. [En Linea]. Disponible en: https://www.thaiparker.co.th/en/articles/laboratory-services/the-importance-of-wastewater-analysis. Fecha de consulta: 12 de febrero 2023.

Takeuchi, K. (2005). Encyclopedia of analytical science (Second Edition). *Elsevier (Eds.)*. Ozone. .462-471

USGS, Water science school (2018). Wastewater treatment water use, Estados Unidos de América, en usgs.gov. [En Línea]. Disponible en: https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/wastewater-treatment-water-use. Fecha de consulta: 2 de octubre de 2022.

Wang, Y., Wang, N., Li, M., Bai, B. & Wang, H. (2022). Potassium ferrate enhancing ozone treatment for pharmaceutical wastewater – oxidation and catalysis. *SSRN Product & services.* 49: 103055.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Biopolímeros y algunas de sus aplicaciones

Biopolymers and their applications

M. de J. Laredo – Guia, L. Farías-Cepeda*, Adalí O. Castañeda Facio, Y. Karina Reyes Acosta

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Boulevard Venustiano Carranza. S/N. C.P. 25280, Colonia Republica; Saltillo, Coahuila.

*Autor de correspondencia: Dra. L. Farías-Cepeda, E-mail: lorenafarias@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

Se presenta un análisis de la literatura referente a la obtención y aplicaciones de algunos biopolímeros, como sustitutos de polímeros sintéticos. Se desea mitigar el impacto ambiental provocado el uso excesivo de los polímeros sintéticos mediante su sustitución por biopolímeros. Los biopolímeros más utilizados son el almidón, el agar, el quitosano, las algas, poli(hidroxialcoanoatos) (PHAs), poli(ácido láctico) (PLA), entre otros. Los biopolímeros pueden ser empleados como películas o recubrimientos en empaques, liberadores de fármacos y regeneración tisular, así como en la industria automotriz, alimenticia, etc. Ente las principales características de los biopolímeros es que son biodegradables, biocompatibles, no son tóxicos y algunos de ellos pueden ser antioxidantes, antimicrobianos además se pueden funcionalizar y formar biocompuestos para mejorar sus propiedades de procesabilidad, térmicas y mecánicas. Sin embargo, la producción masiva de los biopolímeros aún está en desarrollo**.**

Palabras clave: Polímero, biopolímero, biodegradable.

Abstract

A literature analysis is presented about the obtention and application of biopolymers, as substitutes for synthetic polymers in other to mitigate the environmental impact caused by their excessive use. The most widely used biopolymers are starch, agar, chitosan, algae, poly(hydroxyalcanoates) (PHAs), poly(lactic acid), among others. Some biopolymers

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

applications are as films or coating in packing, drug releases and tissues regeneration, also in the automotive and food industry and others. The main characteristics of biopolymers are biodegradability, biocompatibility, non-toxic and some of them can be antioxidants, antimicrobials, also they can be functionalized or form biocomposites to improve their processability, thermal and mechanical proprieties. However, the mass production of biopolymers is still under development.

Keywords: Polymer, biopolymer, biodegradable.

Introducción

El uso de los polímeros sintéticos formulados a base de petróleo ha provocado la contaminación de ríos y mares afectando la calidad del suelo y del agua, haciendo un gran daño en la ecología por los desechos generados. Uno de los principales problemas es el tiempo de degradación que tienen los polímeros sintéticos, la cual puede llegar a ser mayor de 150 años. Dada esta problemática se han realizado distintas investigaciones enfocadas a buscar alternativas para remplazar a los polímeros sintéticos por polímeros naturales (biopolímeros) ya que la mayoría de estos se degradan en menor tiempo y son descompuestos fácilmente por organismos vivos (biodegradable) en comparación con los sintéticos, además se busca que los biopolímeros presenten propiedades similares a la de los polímeros sintéticos para utilizarlos como sustitos en sus diferentes aplicaciones. Entre los biopolímeros que más se utilizan son el quitosano, el agar, la celulosa, el PLA entre otros, generalmente como sustitutos de recubrimientos plásticos y otras aplicaciones aprovechando sus propiedades antimicrobianas, antioxidantes, no toxicidad y biodegradabilidad. En el presente artículo se

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

hace un breve análisis de la literatura sobre el panorama general de los biopolímeros utilizados como películas o recubrimientos, por ejemplo, en el área alimenticia y de la salud.

Antecedentes

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) evidenció en octubre del 2021 que la contaminación se ha acrecentado enormemente por el uso de polímeros sintéticos y se pronostica un incremento al doble para el año 2030. En un análisis estos desechos están relacionados con la generación de 1.7 gigatoneladas de CO_2 a nivel mundial, por lo que se requiere urgentemente generar alternativas para remplazar los plásticos y/o en su defecto proponer mejores maneras de reusarlos y reciclarlos para tratar de mitigar su impacto ambiental *(ONU programa para el medio ambiente, 2021).*

Como alternativa ecológica para mitigar la contaminación, el efecto, se busca el remplazo de los polímeros sintéticos por lo que, se investigan distintos biopolímeros como sustitutos en diversas aplicaciones, una de ellas es el empaque de alimentos, donde los biopolímeros pueden ser procesados mediante las mismas técnicas que los sintéticos, facilitando su manejo *(Valero-Valdivieso y col., 2013).* Los biopolímeros son polímeros que son de origen natural y su principal característica es que son biodegradables, donde los más comunes provienen de plantas o residuos biodegradables, entre los que se encuentran el almidón, la celulosa, algunos poliésteres, celofán, los polihidroxialcanoatos y el ácido poliláctico, entre otros. Sn embargo la mayoría de los biopolímeros tienen bajas propiedades mecánicas por lo que es necesario el uso de aditivos para mejorar las propiedades y poder utilizarlos como sustitutos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

de los sintéticos, por lo que es necesario invertir mayor cantidad de recursos de investigación para desarrollar biopolímeros con buenas propiedades *ZSCHIMMER & SCHWARZ ESPAÑA, 2022), (Sid y col., 2021).* En la Figura 1 se muestran las principales características de los biopolímeros y algunas de sus aplicaciones.

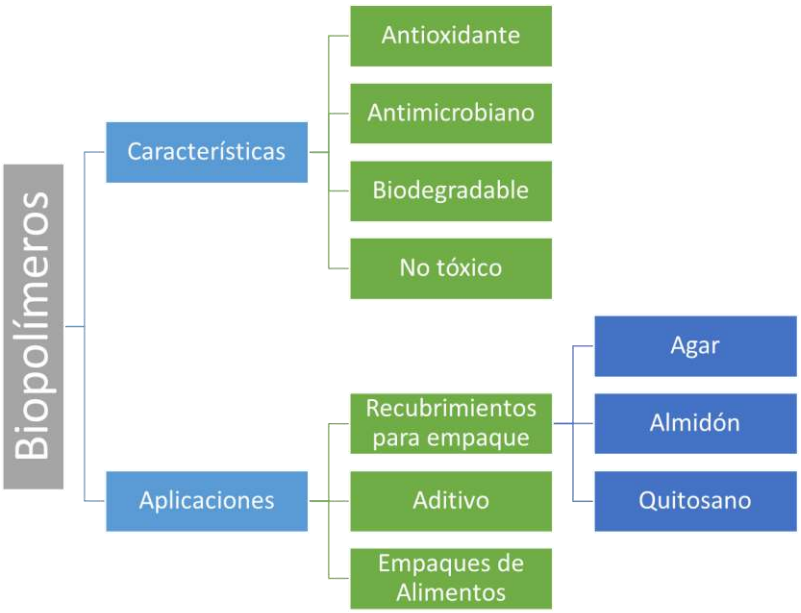


Figura 1, Características y aplicaciones de biopolímeros. Autoría propia.

Obtención de biopolímeros

Actualmente se reutilizan algunos desperdicios agroindustriales como sustratos para generar biopolímeros, debido su naturaleza, generalmente se obtienen mediante extracción o fermentación en estado sólido, ya sea con tratamiento o sin pretratamiento. Una vez extraídos los azúcares fermentables, se obtienen subproductos como la celulosa, el almidón, la pectina. En el caso de la quitina (derivado del quitosano) además de la fermentación también se puede

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

obtener vía enzimática, generalmente a partir de caparazones de algunos crustáceos *(Ranganathan y col., 2020)*.

Otra manera de obtener biopolímeros es sintetizarlos a partir de monómeros de origen natural o biomonómeros tales como los ácidos, glucónico, láctico, itacónico. En la actualidad el 98% de los polímeros son derivados del petróleo, por lo que se buscas nuevas alternativas para producir biopolímeros. Dentro del concepto de biorrefinería Magalhães y col. proponen que los ácidos, glucónico, láctico, itacónico son una alternativa rentable para la producción de biopolímeros. *(Magalhães Júnior y col., 2021).*

Los terpenos son hidrocarburos que contienen uno o más dobles enlaces y que además algunos de ellos contienen una unidad de isopreno dentro de su estructura molecular (ver Figura 2), estos son abundantes y baratos ya que se extraen de coníferas y algunas semillas, lo que los suele hacer una materia prima ideal para la síntesis de fragancias, sabores, fármacos y solventes. Sin embargo, muy pocos de estos han sido estudiados como monómeros para biopolímeros. Solo el α-pineno, β-pineno, mirceno y el limoneno han sido estudiados extensamente para la síntesis de biopolímeros *(Wilbon y col., 2013)*.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

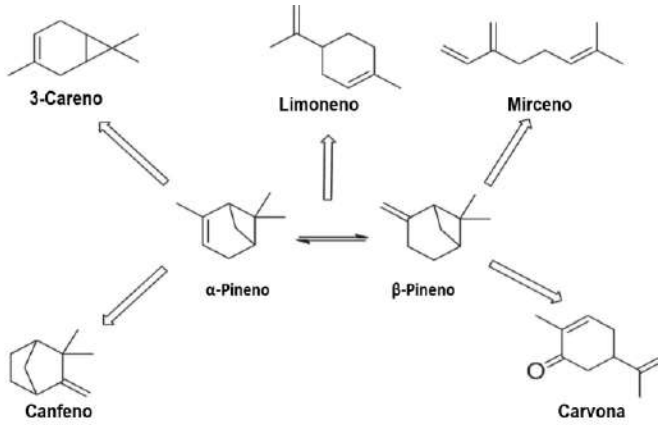


Figura 1. Estructuras químicas de algunos derivados de los terpenos *(Wilbon y col., 2012*).

Además de los anteriores se está utilizando el mucilago de diferentes plantas como el nopal y la chia. del nopal se puede usar el extracto, la baba y hasta el mucilago, algunas de sus aplicaciones registradas son como pegamento, impermeabilizante, protector de murales y más recientemente como un biopolímero *(Aguilar, 2022*). En ese mismo sentido el mucilago de chia que es utilizado la industria alimenticia, cosmética y farmacéutica como aditivo espesante o como películas, generalmente se extra por técnicas de ultrasonido *(Silva y col., 2022)*.

Los poli(hidroxialcanoatos) (PHA) son biopolímeros de tipo poliésteres sintetizados por cierto tipo de bacterias que los acumulan como reservas de carbono y energía, que tienen forma de gránulos intra-citoplasmáticos, constituidos por unidades repetitivas de diversos hidroxiácidos o mezclas de ellos, producidos mediante fermentación de materias primas renovables. El microrganismo produce los PHA directamente mediante fermentación de una fuente de carbono. Los PHAs pueden ser degradados hasta CO_2 y agua o metano dependiendo

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

de las condiciones por acción de las enzimas PHA despolimerasas y PHA hidrolasas. Existen más de 150 tipos de PHA, bebido a la gran diversidad de sustratos agroindustriales utilizados (material orgánico de bajo costo) y a la cepa bacteriana que se pueden utilizar para obtenerlos. Por lo que cada combinación de sustrato y cepa pude generar diferente tipo y composición de monómeros constituyentes por lo que se pueden adaptar para lograr la mayor biocompatibilidad y mejorar propiedades de uso final, así como una tasa de degradación del polímero deseado. Los PHAs tienen un alto grado de polimerización, con un grado de cristalinidad entre el 60 y 80%, son activos óptimamente, isotácticos e insolubles en agua. Estas características los hacen altamente competitivos con el polipropileno y otros plásticos derivados del petróleo. Entre las aplicaciones más destacadas de los PHAs son aplicaciones biomédicas y sé que se ha demostrado que es biodegradable en un sinfín de ambientes; como películas de empaquetado en bolsas, contenedores y empaques de papel. Se han reportado otras aplicaciones como utensilios, productos higiénicos femeninos, contenedores de cosméticos y envases de shampoo, también como liberadores de fármacos y agroquímicos, así como en ingeniería tisular *(Valero-Valdivieso y col., 2013).*

Aplicaciones de los biopolímeros

Algunos de los biopolímeros que tienen avances a la fecha para remplazar los recubrimientos utilizados como empaques alimenticios son la celulosa y el quitosano debido a que son estos son biodegradables*(Mujtaba y col., 2022).* El quitosano es un derivado del desacetilado de la quitina proveniente de cangrejos, camarones y langostas *(Plackett, 2011).* Sin embargo, aun

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

su producción requiere mucho trabajo por lo que se busca optimizar el proceso*(Priyadarshi & Rhim, 2020).*

El agar es un alginato (polisacárido), entre sus propiedades destacan la de ser filmógeno transparente, no tóxico, biodegradable y soluble en agua *(Plackett, 2011),* es por eso que se desarrollan películas protectoras para aplicaciones de empaque. A pesar de sus buenas propiedades presenta algunas desventajas como que la película de agar puro, es relativamente frágil con baja elasticidad, pero con buena estabilidad térmica, alta sensibilidad al agua y alta permeabilidad lo que limita sus aplicaciones industriales *(Mostafavi & Zaeim, 2020).*

Una ventaja de los biopolímeros es que pueden utilizarse aquellos a base de plantas ya que sus componentes son biodegradables y algunos poseen características antimicrobianas o antioxidantes. En el 2020 Jafarzadeh y col. reportaron el uso de plantas tropicales y sus subproductos para fabricar envases de alimentos siendo así una opción ecológica y a su vez se demostró que pueden ayudar a mejorar la vida útil de los alimentos que son envasados en este tipo de empaque*(Jafarzadeh y col., 2020).*Dada la necesidad de tener opciones para remplazar los polímeros sintéticos en los empaques alimenticios se han investigado el uso de proteínas vegetales, como la proteína de soja, gluten de trigo, zeína de maíz y macrófitos para su uso en películas plásticas *(Assad y col., 2020).* Por otro lado, la fibroína de seda es un biopolímero que representa cerca del 70% de la fibra de seda que se obtienen de los capullos o de los desperdicios de la producción de la seda. Para el desarrollo de empaques de alimentos con fibroína de seda, esta puede modificar a otros biopolímeros (como aditivo) o la fibroína ser modificada con otros componentes. Entre las propiedades que confiere la

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

fibroína de seda al material de empaque es el aumento de la permeabilidad de oxígeno, resistencia a la rotura y una mayor velocidad de degradación del biopolímero *(Ríos y col., 2017).*

Gracía-Martínez y col. en 2020 desarrollaron un material compuesto a base del alga combinada con celulosa y almidón con el fin de utilizar el sargazo que se acumulaba en playas mexicanas. Ellos fabricaron un plato con este material el cual demostró tener menor tiempo de degradación y mayor dureza que el plato comercial (cartón), por lo que el material puede ser una alternativa para la fabricación de empaques amigables con el medio ambiente *(García Martínez y col., 2020).*

Por otro lado, existe la necesidad de mejorar los tratamientos médicos actuales tratando de evitar efectos secundarios, para ello es necesario el desarrollo de nuevos materiales. Por ello se empezaron a utilizar los sistemas de libración de medicamentes poliméricos y recientemente los sistemas biopolímeros como estrategias terapéuticas en la liberación de fármacos y en la ingeniería tisular. El reto al utilizar los biopolímeros es su solubilidad y su funcionalización, así como sus interacciones intramoleculares. Entre los biopolímeros más prometedores están la celulosa y el almidón, así como sus derivados, en forma de hidrogeles, películas y compuestos. Entre las afecciones que se están tratando con este tipo de sistemas biopoliméricos con infracción en hueso, infecciones microbianas y cáncer *(Gopinath y col., 2022).* Así mismo, Molina y col. en 2020 hacen un análisis del uso de diferentes biopolímeros como agentes de liberación de medicamentos ya que se pueden utilizar como cápsulas nanométricas, lo anterior debido a su versatilidad, además de ser antimicrobianos,

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

biocompatibles y biodegradables. Entre los biopolímeros más utilizados como liberadores de fármacos se encuentran PVA (alcohol polivinílico), la pectina, el quitosano, el almidón, entre otros. Alungas otras aplicaciones de estos biopolímeros son la biorremediación, la catálisis enzimática y el empaquetamiento de alimentos *(Molina & Flórez-Castillo, 2020).*

Los exopolisacáridos (EPS: sustancias poliméricas extracelulares) son compuestos excretados por algunos microorganismos (Pseudomonas, Lactococcus y Bacillus). Una aplicación de las aplicaciones de EPS es la biorremediación del medio ambiente consiste en su adición al suelo con el objeto de controlar la desertificación de este. Ya que reducen la erosión del suelo, al incrementar en la cohesión interpartícular, ya que modifica las características de retención de agua del suelo contra la evaporación mejorando la germinación de la vegetación. Así mismo se han empleado EPS para incrementar la fijación de nitrógeno en los suelos *(Ospina, 2015*).

Como se expuso los biopolímeros tienen diferentes aplicaciones y estas continúan aumentando encaminados a sustituir a los polímeros sintéticos. Lo anterior es debido a sus excelentes propiedades y su facilidad de modificación con diferentes métodos. La incorporación de diferentes aditivos a los biopolímeros los convierte en materiales más versátiles lo que amplía su abanico de aplicaciones, en áreas como medicina, agricultura, automotriz, alimenticia, entre otras. Los biopolímeros tienen grupos activos, los cuales pueden interaccionar con otros haciendo posible la formación de biocompuestos y así mejorar sus propiedades. Los aditivos utilizados pueden ser orgánicos e inorgánicos y en diferentes

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

escalas lo que genera una gran variedad de productos con muchísimas aplicaciones *(Amenorfe y col., 2022)*.

A partir de plantas y hongos se pueden obtener metabolitos secundarios naturales los cuales han atraído la atención de la industria de empaques alimenticio debido a sus propiedades antimicrobianas al inhibir el crecimiento de agentes patógenos y al evitar la oxidación de los alimentos. Dependiendo de la formulación, el método de preparación y de las interacciones físicas o químicas entre los grupos funcionales del biopolímero y el aditivo se pueden modular las propiedades mecánicas de la biopelícula *(Moeini y col., 2021)*. En ese sentido Oyekanmi y col. estudiaron el efecto de la concentración del aceite de canela como aditivo en películas de nanofibras de celulosa, lo que dio como resultado que estas películas presentaran mejores propiedades fisicoquímicas, térmicas y antimicrobianas por lo que demostraron que el aceite de canela ayuda a mejorar propiedades dependiendo de su concentración, y proponen que esas películas pueden ser una alternativa más ecología al ser utilizadas como empaques de alimentos *(Oyekanmi y col., 2021).*

El almidón utilizado como empaque

El almidón es un polisacárido, su principal componente es la amilosa y que es un biopolímero generado por plantas, razón por la cual es uno de los biopolímeros más abundantes. Por su abundancia es de bajo costo generalmente se obtiene de semillas, raíces y tubérculos, tiene

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

la característica de ser termoplástico. El almidón es ampliamente utilizado en la industria alimenticia y textil aunque es necesario optimizar sus procesos de obtención para tener un mayor aprovechamiento y generar beneficio ecológico al ser utilizado, razón por la cual se investiga como poder explorar sus propiedades para empaques *(Plackett, 2011)***.** El almidón pueden ser utilizado junto con otro biopolímero para formar películas y puede procesare mediante extrusión hasta por electro-hilado para formar fibras nanométricas *(Cheng col., 2021).*

Robayo-Gallego desarrollo un empaque inteligente que cambia de color cuando el queso Paipa se daña, lo que indicara a los consumidores si el queso es apto o no para su consumo. Utilizó un biopolímero a base de almidón de yuca, al cual se incorpora un pigmento natural en polvo llamado antocianina que cambia su tonalidad ante un cambio de pH en el queso. Para la formulación del empaque además del almidón de yuca y la antocianina utilizaron glicerol, agua y ácido cítrico. Ellos evaluaron el cambio de tonalidad de la película con el pH y la formulación que presento mayor cambio de tonalidad fue la que contenía el 5% ácido cítrico y 1% antocianina, igualmente, realizaron pruebas mecánicas y de permeabilidad al vapor de agua. *(Robayo-Gallego, 2018).*

Tarique y colaboradores estudiaron las propiedades de las fibras de arrurruz y el almidón de Maranta, los cuales son utilizados en la industria alimenticia como espesantes, además no son tóxicos para el ser humano, y no afectan el sistema sanguíneo. Ellos evaluaron sus propiedades mediante difracción de rayos X, y viscosimetría, y atribuyen que sus propiedades dependerán de la estructura del granulo. Gracias a su alto contenido de amilosa es factible su

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

uso para preparación de películas y empaques comestibles, es por ello que este tipo de almidón y las fibras de arrurruz son utilizados ampliamente en la industria farmacéutica, en productos cosméticos, textiles, etc. *(Tarique col., 2021).*

Los empaques biodegradables son una alternativa viable ya que tienen características que facilitan su degradación y de alguna manera lograr mitigar el impacto ambiental que el uso de los polímeros derivados del petróleo está causando *(Shaikh y col., 2021)*. Aunado a esto se han buscado alternativas para el desarrollo de empaques biodegradables, mostrando las ventajas que estos tienen dentro de las cuales se destaca el tiempo de descomposición, el hecho de ser más seguros por no ser tóxicos, el cómo su disposición puede disminuir el impacto ambiental ya que pudieran ser empaques comestibles. Se exploran todas las posibles aplicaciones que se les puede dar en la industria, buscando también su rentabilidad de producción, en el sector alimenticio se resalta que estos tipos de biopolímeros también son antimicrobianos y seguros en su uso lo que proporciona ventajas de estos. Buscando que en un futuro cercano se logre aprovechar todas las propiedades que este tipo de biopolímeros de origen natural ofrecen, por lo que se debe seguir investigando y desarrollando aplicaciones de estos *(Yuvaraj y col., 2021).*

Conclusiones

En acuerdo a la revisión realizada, es posible sustituir en algunas aplicaciones a los polímeros derivados del petróleo por biopolímeros, como lo es en empaques y recubrimientos de alimentos, agentes de liberación de medicamentos, regeneración tisular, entro otras. Algunos biopolímeros pueden ser utilizados como espesantes o recubrimiento alimenticos como son

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

los mucilagos de nopal y chia. El uso puede mitigar el impacto ambiental que ha generado el uso de polímeros sintéticos ya que son biodegradables por lo que se descomponen un menor tiempo en el medio habiente y hay algunos que pueden degradarse completamente en CO_2 y agua. así como el almidón y la celulosa se encuentran con abundancia en la naturaleza existen otros biopolímeros que son más difíciles de obtener por lo que actualmente se desarrollan nuevas técnicas de producción para que sean más rentables y se pueden comercializar a menor costo para maximizar sus beneficios.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila, por el acceso a la información para realización de esta revisión, y de igual manera se agradece a el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada # 826412. Además de agradecer a mi familia, esposo e hijos por ser la principal motivación para seguir esforzándome.

Referencias:

Aguilar, N. G. (2022). Biopolímeros: La explosión de la era eco-amigable. *RD-ICUAP*. *8*(23): Art. 23. http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/806

Amenorfe, L. P., Agorku, E. S., Sarpong, F., & Voegborlo, R. B. (2022). Innovative exploration of additive incorporated biopolymer-based composites. *Scientific African*. *17*: e01359. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01359

Apriyanto, A., Compart, J., & Fettke, J. (2022). A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and in planta modifications. *Plant Science*. *318*: 111223. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111223

Assad, I., Bhat, S. U., Gani, A., & Shah, A. (2020). Protein based packaging of plant origin: Fabrication, properties, recent advances and future perspectives. *International Journal of Biological Macromolecules*. *164*: 707–716. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.140

Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., Miao, M., Tian, Y., & Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*.*114*: 70–82. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017

Gallego, J. D. R. (2018). Elaboración de un biopelímero a base de almidón de yuca como indicador de cambio de pH para un queso tipo Paipa. *2018*.

García Martínez, K., Sánchez Fuentes, C. E., Salazar Cano, J. R., Gómora Herrera, D. R., & Santana Cruz, A. (2020). Obtención y caracterización de un biopolímero a partir del alga (Sargassum sp.) para elaborar empaques de un solo uso en combinación con celulosa y almidón. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química. Año 6, número 6 (enero-diciembre de 2020). ISSN: 2448-6663*. http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/7754

Jafarzadeh, S., Jafari, S. M., Salehabadi, A., Nafchi, A. M., Uthaya Kumar, U. S., & Khalil, H. P. S. A. (2020). Biodegradable green packaging with antimicrobial functions based on the bioactive compounds from tropical plants and their by-products.

Trends in Food Science & Technology. *100*: 262–277. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.017

Magalhães Júnior, A. I., Soccol, C. R., Camara, M. C., Molina Aulestia, D. T., Porto de Souza Vandenberghe, L., & Cesar de Carvalho, J. (2021). Challenges in the production of second-generation organic acids (potential monomers for application in biopolymers). *Biomass and Bioenergy*. *149*: 106092. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106092

Molina, A., & Flórez-Castillo, J. M. (2020, agosto 5). Biopolímeros como sistemas de bioencapsulación. *Prospectiva*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19521.17767/1

Mostafavi, F. S., & Zaeim, D. (2020). Agar-based edible films for food packaging applications—A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. *159*: 1165–1176. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.123

Mujtaba, M., Lipponen, J., Ojanen, M., Puttonen, S., & Vaittinen, H. (2022). Trends and challenges in the development of bio-based barrier coating materials for paper/cardboard food packaging; a review. *Science of The Total Environment*. *851*: 158328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158328

ONU programa para el medio ambiente. (2021, octubre 21). *Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente*. UN Environment. http://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos

Ospina, S. (2015). Biopolímeros y su aplicación en medio ambiente. *Revista Colombiana de Biotecnología*.*17*(2): Art. 2. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n2.54295

Oyekanmi, A. A., Abdul Khalil, H. P. S., Rahman, A. A., Mistar, E. M., Olaiya, N. G., Alfatah, T., Yahya, E. B., Mariana, M., Hazwan, C. M., & Abdullah, C. K. (2021). Extracted supercritical CO2 cinnamon oil functional properties enhancement in cellulose nanofibre reinforced Euchema cottoni biopolymer films. *Journal of Materials Research and Technology*. *15*: 4293–4308. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.025

Plackett, D. (Ed.). (2011). Front Matter. En *Biopolymers – New Materials for Sustainable Films and Coatings* (1a ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119994312.fmatter

Priyadarshi, R., & Rhim, J.-W. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. *62*: 102346. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102346

Ranganathan, S., Dutta, S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Utilization of food waste streams for the production of biopolymers. *Heliyon*. *6*(9): e04891. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04891

Ríos, Á. D., López, C. Á., Riaño, L. J. C., & Osorio, A. R. (2017). *Revisión: Fibroína de seda y sus potenciales aplicaciones en empaques biodegradables para alimentos*. *15*(1).

Shaikh, S., Yaqoob, M., & Aggarwal, P. (2021). An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*.*4*: 503–520. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.07.005

Sid, S., Mor, R. S., Kishore, A., & Sharanagat, V. S. (2021). Bio-sourced polymers as alternatives to conventional food packaging materials: A review. *Trends in Food Science & Technology*.*115*: 87–104. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.026

Silva, L. A., Sinnecker, P., Cavalari, A. A., Sato, A. C. K., & Perrechil, F. A. (2022). Extraction of chia seed mucilage: Effect of ultrasound application. *Food Chemistry Advances*. *1*: 100024. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100024

Tarique, J., Sapuan, S. M., Khalina, A., Sherwani, S. F. K., Yusuf, J., & Ilyas, R. A. (2021). Recent developments in sustainable arrowroot (Maranta arundinacea Linn) starch biopolymers, fibres, biopolymer composites and their potential industrial applications: A review. *Journal of Materials Research and Technology*. *13*: 1191–1219. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.047

Valero-Valdivieso, M. F., Ortegón, Y., & Uscategui, Y. (2013). *BIOPOLÍMEROS: AVANCES Y PERSPECTIVAS BIOPOLYMERS: PROGRESS AND PROSPECTS*. 10.

Wilbon, P. A., Chu, F., & Tang, C. (2013). Progress in Renewable Polymers from Natural Terpenes, Terpenoids, and Rosin. *Macromolecular Rapid Communications*. *34*(1): 8–37. https://doi.org/10.1002/marc.201200513

Yuvaraj, D., Iyyappan, J., Gnanasekaran, R., Ishwarya, G., Harshini, R. P., Dhithya, V., Chandran, M., Kanishka, V., & Gomathi, K. (2021). Advances in bio food

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 28 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 18 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

packaging – An overview. *Heliyon.7*(9): e07998. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07998

ZSCHIMMER & SCHWARZ ESPAÑA. (2022, abril 6). *¿Qué son los biopolímeros y para qué se utilizan en la industria?* ZS España. https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-son-los-biopolimeros/

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Textiles con propiedades antimicrobianas para el control de las infecciones intrahospitalarias

Textiles with antimicrobial properties for the control of hospital-acquired infections

Wendy Y. Villastrigo-López[1*], Aidé Sáenz-Galindo[1], Adali Castañeda-Facio[1], Miriam D. Dávila-Medina[1], Christian J. Cabello-Alvarado[2].

[1]Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Blvd. Venustiano Carranza y José Cárdenas Valdés, S/N, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.
[2]CONACYT - Centro de Investigación en Química Aplicada, Enrique Reyna H. No.140, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: Wendy Yaneth Villastrigo López
Universidad Autónoma de Coahuila
Correo: wendy_lopez@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

RESUMEN

Las infecciones intrahospitalarias son causadas por patógenos que se encuentran presentes en dispositivos e insumos que se utilizan en hospitales. Es un problema que persiste y cada vez aumentan más los casos de infecciones adquiridas al interior de los hospitales, a pesar de que existen normas para la adecuada limpieza y lavado de estos materiales. Debido a esto nace el interés en la comunidad científica por fabricar textiles con propiedades antimicrobianas. Existen diversas investigaciones realizadas en los últimos años utilizando diversos agentes antimicrobianos (nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos) para incorporarlos en telas tejidas, no tejidas y brindarles propiedades antimicrobianas. De manera que con estos textiles se fabriquen paños quirúrgicos, batas, cubrebocas, vendas, apósitos que posean propiedades antimicrobianas y que sirvan para el control de las infecciones intrahospitalarias. Por lo cual, en el presente artículo de revisión bibliográfica se abordan los diferentes tipos de agentes antimicrobianos y telas que se utilizan para la fabricación de textiles con propiedades antimicrobianas para erradicar los patógenos causantes de las infecciones intrahospitalarias.

Palabras clave: textiles, agentes antimicrobianos, infecciones.

ABSTRACT

Intrahospital infections are caused by pathogens that are present in devices and supplies used in hospitals. It is a problem that persists and more and more cases of infections acquired inside hospitals are increasing, despite the fact that there are rules for proper cleaning and washing of these materials. Due to this, the interest in the scientific community to

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

manufacture textiles with antimicrobial properties. There are several investigations carried out in recent years using various antimicrobial agents (metal nanoparticles and metal oxides) to incorporate them in woven, non-woven fabrics and provide antimicrobial properties. So that with these textiles surgical cloths, labcoat, face masks, bandages and ressings that have antimicrobial properties and serve to control infections in hospitals. Therefore, this literature review covers the different types of antimicrobial agents and fabrics that are used for the manufacture of textiles with antimicrobial properties to eradicate pathogens causing infections addressed in hospital.

Key words: antimicrobial agent, woven, non-woven.

1. INTRODUCCIÓN

Las infecciones intrahospitalarias representan un serio problema a nivel mundial. Son las responsables de un aumento considerable en las tasas de morbimortalidad, extensión del periodo de hospitalización, aumento directo sobre los costos de atención hospitalaria, además de favorecer la selección de microorganismos multirresistentes (Pírez y col., 2020; Vilca y col., 2020).

Estas infecciones constituyen un riesgo permanente en la asistencia sanitaria, se encuentran asociadas a múltiples factores y es la complicación hospitalaria más frecuente (Vilca y col., 2020). Entre los factores responsables de desencadenar estas infecciones, se encuentran: la escasa inmunidad de los pacientes, objetos contaminados y vestimenta del personal de salud (Vargas, 2015).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

La ropa que viste el personal de salud también constituye una fuente para el crecimiento de microorganismos, debido a que tienden a proliferar en ambientes húmedos (Bockmühl y col., 2019). Aun cuando existen guías para la adecuada limpieza del ambiente hospitalario, los patógenos poseen mecanismos para adaptarse y sobrevivir durante periodos de tiempo prolongados (Esteves y col., 2016).

La preocupación por la higiene y protección, tanto del personal de salud como de los pacientes, ha motivado al desarrollo de nuevos textiles con funciones antibacterianas y antifúngicas (Zapata y col., 2018). De este modo, los textiles antimicrobianos son uno de los campos más importantes en el sector textil, involucrando nuevos descubrimientos y la aplicación de agentes antimicrobianos (Zarzuela, 2020).

Dentro de los agentes antimicrobianos que se pueden emplear para la fabricación de textiles, se encuentran las nanopartículas (NPs) metálicas y de óxidos metálicos (Serna y col., 2017). Por cual, el objetivo de esta revisión bibliográfica es describir los diferentes tipos de telas y agentes antimicrobianos que presenten la posibilidad de fabricar textiles con propiedades antimicrobianas, de manera que sirvan como una alternativa para el control de las infecciones intrahospitalarias.

2. ANTECEDENTES

Los estudios realizados alrededor del mundo documentan que las infecciones intrahospitalarias son una importante causa de morbilidad y mortalidad (Siegel y col., 2007). Una elevada frecuencia de infecciones intrahospitalarias comprueba que la calidad en la

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

prestación de los servicios de atención de salud es deficiente (Arévalo y col., 2003). Diversos factores son los causantes de la frecuencia de estas infecciones: los pacientes hospitalizados sufren a menudo compromiso inmunitario, se someten a tratamientos invasivos y el medio del hospital puede facilitar la transmisión de microorganismos (Vargas, 2015).

2.1 ¿Qué son las infecciones intrahospitalarias?

Las infecciones intrahospitalarias son contraídas durante la estadía en un hospital, las cuales no se habían manifestado ni estaban en periodo de incubación en el momento en el que el paciente es internado. Suelen ocurrir después de las primeras 48 a 72 horas de hospitalización (Castañeda y col., 2015; Arista y col., 2019).

Se han establecido definiciones para identificar las infecciones intrahospitalarias en determinados sitios del organismo, dependiendo del sitio (por ejemplo, infecciones urinarias, pulmonares, etc. (Arista y col., 2019).

2.1.1 Clasificación de las infecciones intrahospitalarias

Estas infecciones se clasifican en función del área que afectan:

- Bacteremia: son aquellas que afectan directamente al torrente sanguíneo y suelen ser causadas normalmente por catéteres infectados.
- Neumonía: son las que perjudican las vías respiratorias, concretamente inflamando los alveolos pulmonares.
- Vías urinarias: se relacionan directamente con el uso de bolsas de orina.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

- Sitio quirúrgico: son aquellas que se adquieren al someter al paciente a una operación, ya sea durante la intervención o a lo largo del proceso de cicatrización y recuperación. Estas infecciones pueden infectar al receptor por partículas suspendidas en el aire o por contacto directo con la fuente infecciosa o material contaminado (Zamora y col., 2015; Arista y col., 2019).

2.1.2 ¿Cómo se transmiten?

La transmisión de agentes infecciosos dentro de un hospital requiere de tres elementos: 1) una fuente infecciosa, 2) un huésped susceptible y 3) una vía de entrada para los agentes. También pueden ser causadas por fuentes endógenas al paciente (su propia piel, mucosa nasal, bucal o tracto gastrointestinal) o exógenas (visitantes, dispositivos médicos o el propio hospital (Martínez & Zavala, 2022).

Los mecanismos de transmisión varían según el tipo de organismo y algunos agentes infecciosos pueden ser transmitidos por más de una ruta (Loayza y col., 2020). Existen tres rutas principales de transmisión, las cuales se describen a continuación:

- Transmisión por contacto directo: los microorganismos se trasmiten de una persona infectada a otra.
- Transmisión por contacto indirecto: implica la transferencia de un agente infeccioso a través de un objeto contaminado, como las manos contaminadas o algún dispositivo de atención al paciente (termómetros, glucómetros, etc.) que se comparten entre los pacientes sin limpieza y desinfección.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

- Transmisión por gotas: los patógenos transmiten la infección cuando viajan directamente desde el tracto respiratorio del individuo infectado al destinatario. Las gotas se generan al toser, estornudar o hablar (Loayza y col., 2022).

2.1.3 Microorganismos involucrados en la transmisión

Dentro de los patógenos más comunes asociados a las infecciones intrahospitalarias, se encuentran bacterias, virus, parásitos y hongos. En la Tabla 1 se presentan los diferentes tipos de microorganismos que están involucrados en las infecciones intrahospitalarias y varían dependiendo de la población de pacientes, del establecimiento de atención de salud y país (Asensio y col., 2018).

Tabla 1. Microorganismos involucrados en las infecciones intrahospitalarias (Zamora y col., 2018; Morales y col., 2022).

Microorganismos	**Patógeno**	**Área que colonizan**
Bacterias Gram positivas	*Staphylococcus aureus*	Piel y nariz del personal de salud y de los pacientes.
Bacterias Gram negativas	*Escherichia coli*	Diversos sitios cuando las defensas del huésped están comprometidas (inserción de un catéter o sonda vesical).
	Pseudomonas spp	Aparato digestivo de los pacientes hospitalizados.
Virus	Hepatitis B y C	Torrente sanguíneo.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Hongos	*Aspergillus spp*	Microorganismos transportados por el aire, colonizando suelo y aire.

2.1.4 Medidas de prevención

La prevención estándar de las infecciones intrahospitalarias incluye un grupo de prácticas que aplican a todos los pacientes, independientemente de la sospecha o confirmación de las infecciones, en cualquier entorno en el que se realiza atención sanitaria (Fajardo, 2017).

Las prácticas de prevención incluyen, el uso de guantes, bata, mascarilla, lentes de protección para los ojos, como se muestra en la Figura 1, el correcto lavado de manos y correcta esterilización de instrumentos. También los equipos en el entorno del paciente, con probabilidad de que se hayan contaminado con fluidos corporales infectados, deben ser manejados de tal manera que se prevenga la transmisión de agentes infecciosos (García y col., 2020).

La implementación de este tipo de precauciones constituye la estrategia primaria para la prevención de la transmisión de las infecciones intrahospitalarias entre los pacientes y el personal de salud (Vermeil y col., 2018). Otra estrategia útil para contrarrestar las infecciones intrahospitalarias es la fabricación y empleo de textiles con propiedades antimicrobianas (Hui y col., 2016).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Figura 1. Equipo de protección del personal de salud. Fuente: https://www.canaldelcongreso.gob.mx/noticias/13122/Presidenta_de_Cmara_de_Diputados_donar_sueldo_para_equipo_mdic

2.2 Textiles con propiedades antimicrobianas

El uso de textiles antimicrobianos en hospitales se asocia con nuevas medidas de prevención que permitan reducir la carga de microorganismos disponible, disminuyéndose a su vez el riesgo de contraer infecciones intrahospitalarias (Shaheen y col., 2016). Este tipo de textiles deben de estar diseñados con texturas regulares que faciliten la limpieza y prevengan el atrapamiento de polvo, deben de resistir el proceso de limpieza y desinfección que se utiliza en los servicios de salud o contar con un proceso de desinfección propio (Shahid y col., 2016).

Los textiles con propiedades antimicrobianas se utilizan en hospitales para el control de infecciones, debido a las propiedades que poseen. Son textiles cuya unidad fundamental son fibras a los cuales se les ha incorporado un agente antimicrobiano, de modo que esté agente pueda destruir o inhibir el crecimiento de microorganismos (Serna y col., 2017).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Son diversos los usos de los textiles con propiedades antimicrobianas dentro de un hospital, debido a que se pueden fabricar vendas, vestimenta quirúrgica, apósitos, paños quirúrgicos, cubrebocas, sabanas, cortinas y batas, a base de tela no tejida y tejida (Tieffemberg y col., 2018).

2.2.1 Tipos de textiles

2.2.1.1 Tela tejida

La tela tejida se define como aquellas estructuras producidas al menos con dos conjuntos de hilos entrelazados por un proceso de tisaje, formando una urdimbre (hilos en sentido longitudinal) y la trama (hilos en sentido transversal), usualmente en ángulo recto entre sí, de acuerdo con un patrón predeterminado de entrelazado, como se muestra en la Figura 2 (Mejía y col., 2019).

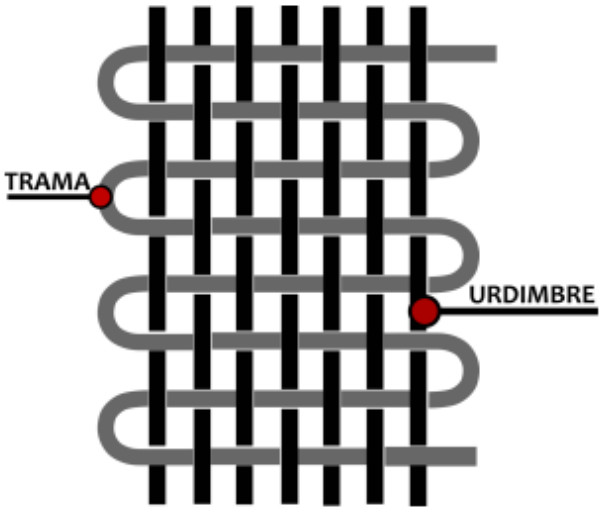


Figura 2. Esquema de fibras en tela tejida (Mejía y col., 2019).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

2.2.1.2 Tela no tejida

La tela no tejida se define como hojas manufacturadas o velo de fibras orientadas direccionalmente o al azar, unidas por fricción, cohesión y/o adhesión, mediante procesos mecánicos, químicos, térmicos o solventes, como se muestra en la Figura 3. Las fibras o filamentos pueden ser naturales (algodón y lana) o sintéticas (nylon y polipropileno) (Mejía y col., 2019).

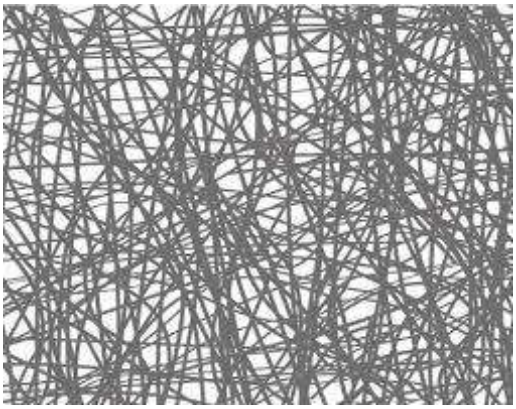


Figura 3. Esquemas de fibras en tela no tejida (Mejía y col., 2019).

2.3 Polímeros que se utilizan en la fabricación de tela no tejida

2.3.1 Polímeros naturales

2.3.1.1 Algodón

Se distingue por ser un tejido plano de origen natural que crece en las semillas de una planta llamada algodonero, el cual por lo regular crece en zonas tropicales. Tiene alto grado de inflamabilidad, se disuelve en hipoclorito de sodio, ácido sulfúrico, es atacado por microorganismos en ambientes húmedos y posee buena abrasión. Es empleado en la industria textil por sus propiedades, entre las que se encuentran: absorbencia, transpirabilidad,

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

hipoalergénico, suavidad, versatilidad y durabilidad, además que es fácil de lavar y teñir (Milagros, 2022).

2.3.1.2 Lana

Entre las fibras naturales de mayor uso en la industria textil, se encuentra la lana, la cual se obtiene a partir de la oveja, alpaca y vicuña. Posee características como aislante térmico, higroscópica, extensible, no es inflamable y es fácil de teñir (Hitega, 2020).

2.3.2 Polímeros sintéticos

2.3.2.1 Nylon

El Nylon fue desarrollado en la fábrica DuPont a finales de la década de 1930 por Wallace Carothers, en la Figura 4, se muestra su estructura química. Se encuentra dentro de la familia de las poliamidas y es un polímero sintético. Dentro de sus características se encuentra resistencia mecánica, dureza, rigidez, buena tenacidad, elevada absorción de humedad y resistencia al desgaste (Carillo y col., 2021).

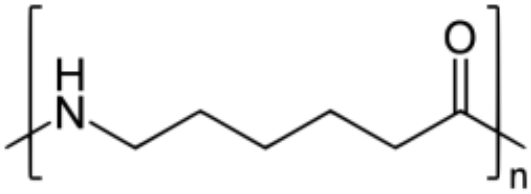


Figura 4. Estructura química del Nylon 6 (Carrillo y col., 2021).

2.3.2.2 Polipropileno

Es un material sintético que comúnmente se utilizan para crear diversos textiles, en la Figura 5, se muestra su estructura química. Las fibras de polipropileno se distinguen por su alta

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

resistencia, por ser impermeables, resistentes al calor, protegen conta la humedad, aislantes, flexibles, resistentes, económicas y baja conductividad eléctrica (Iberoplast, 2019).

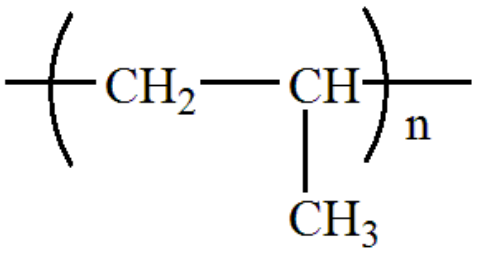


Figura 5. Estructura química del polipropileno (Iberoplast, 2019).

En los últimos años se han realizado estudios en los cuales se emplean este tipo de polímeros naturales y sintéticos para la fabricación de tela no tejida, debido a sus características, de tal manera que sea posible la incorporación de diversos agentes antimicrobianos en este tipo de tela.

2.4 Agentes antimicrobianos que se emplean en textiles

Dentro de los agentes antimicrobianos que se han comenzado a emplear en textiles, se encuentran las NPs metálicas y de óxidos metálicos (Ebrahimzadeh y col., 2019). El interés por lograr un acabo antimicrobiano de materiales textiles que sea eficiente, no tóxico, duradero y rentable, aumenta rápidamente (Pedro y col., 2022). La reducción del crecimiento bacteriano en textiles es muy importante, puesto que estos microorganismos no únicamente dañan el material, sino que también pueden afectar el confort que brindan las vestimentas (Perera y col., 2013).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Los tejidos reforzados con NPs se han convertido en un área de la investigación que busca contener la transmisión de microorganismos relacionados con las infecciones asociadas a la atención en salud (Cabello y col., 2019).

En la actualidad se están implementando los materiales de tamaño nanométrico en la industria textil, debido a que proporcionan distintas funcionalidades, como autolimpieza, conducción eléctrica, protección UV y propiedades antimicrobianas (Cabello y col., 2019). Una de las razones que vuelven a las NPs tan atractivas en la industria textil es que los métodos convencionales utilizados para funcionalizar los tejidos, a menudo no producen efectos permanentes y tienden a perder sus funciones después del lavado o uso de los textiles (Srisod y col., 2018).

2.4.1 Nanopartículas metálicas

Las NPs son materiales que se encuentran en dimensiones de 1 a 100 nm de diámetro. Estas dimensiones les brindan características y propiedades específicos que en tamaños macrométricos no podrían tener (Melchor y col., 2015). Actualmente existe una gran variedad de NPs metálicas tales como plata (Ag), oro (Au), cobre (Cu), titanio (Ti) y zinc (Zn), en donde sus características particulares dependen principalmente de su tamaño, morfología y superficie (Melchor y col., 2015).

2.4.1.1 Nanopartículas de plata (NPsAg)

Las NPsAg se han convertido en las más estudiadas, en áreas como medicina, biología, industria farmacéutica y textil, debido a las propiedades antimicrobianas que posee (Argueta

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

y col., 2019). Estas NPs no necesitan ser funcionalizadas con agentes antimicrobianos para lograr su efecto, ya que estas ejercen esas propiedades a través de la liberación de iones Ag^{+}, los cuales interactúan con la membrana celular de los microorganismos (Del Rocío y col., 2017). Diversos estudios han demostrado que las nanopartículas de plata inhiben el crecimiento mediante efecto bactericida o bacteriostático (Del Rocío y col., 2017).

Torres y colaboradores en 2021, obtuvieron textiles funcionales a base de algodón y NPsAg. Para lo cual realizaron una síntesis controlada in situ de NPsAg sobre fibras de algodón. Las NPs las obtuvieron usando como agente reductor el borohidruro de sodio y obtuvieron tamaños de 9.6 nm.

Rojas y colaboradores en 2017, sintetizaron NPsAg mediante el proceso de poliol y obtuvieron tamaños de 30 nm. Las pruebas antibacterianas mostraron que las telas de algodón con una concentración de 10 y 20 ppm, tenían propiedades frente a *Staphylococcus aureus*.

2.4.1.2 Nanopartículas de cobre (NPsCu)

La actividad antibacteriana de estas NPs se encuentra en función del tamaño y concentración que se emplee. Cruz y colaboradores en 2018, obtuvieron NPsCu con un tamaño de 25 nm y prepararon un compuesto a base de Nylon, mediante extrusión en estado fundido asistido por ultrasonido, donde las nanopartículas se localizaron únicamente en la superficie de la fibra. Los resultados de la evaluación antimicrobiana mostraron que posee propiedades frente a *Staphylococcus aureus* (Cruz y col., 2018).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

2.4.2 Nanopartículas de óxidos metálicos

Dentro de este tipo de NPs se encuentran las de dióxido de titanio (TiO_2) y óxido de zinc (ZnO), debido a que en diversos estudios se ha demostrado que poseen propiedades antimicrobianas.

2.4.2.1 Nanopartículas de dióxido de titanio ($NPsTiO_2$)

El TiO_2 es un óxido metálico de transición y se ha demostrado que es el más adecuado para varias aplicaciones ambientales y energéticas debido a las diferentes propiedades que presenta, como estabilidad a largo plazo, no es toxico, bajo costo y fuerte poder antioxidante (Betancur y col., 2016). En la naturaleza el dióxido de titanio presenta tres formas cristalinas diferentes: anatasa, rutilo y brookita. Las $NPsTiO_2$ han ganado atención para aplicaciones en medicina, las cuales se han demostrado en diversos estudios científicos (Cruz y col., 2018).

La incorporación de estas NPs se realiza de dos maneras diferentes: la primera es incorporar directamente las nanopartículas a las fibras textiles empleando extrusión de una fibra textil y la segunda es mediante la aplicación de las nanopartículas en el proceso de acabado del tejido (Jaguaco y Bonilla, 2018).

André y colaboradores en 2015, sintetizaron $NPsTiO_2$ empleando tratamiento hidrotermal asistido por microondas y posteriormente evaluaron la concentración mínima inhibitoria, por medio de microdilución en caldo. Concluyendo que las nanopartículas obtenidas poseen propiedades antimicrobianas frente a *Candida albicans.*

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

2.4.2.2 Nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO)

El ZnO posee excelentes propiedades eléctricas, mecánicas, ópticas, catalíticas, fotoquímicas y antimicrobianas. Las NPsZnO presentan una gran ventaja sobre otros óxidos metálicos, debido a su gran área superficial y alta conductividad, convirtiéndolo en un excelente fotocatalizador para la eliminación de contaminantes orgánicos, amigable con el medio ambiente, no toxico y uno de los más económicos (Ong y col., 2018). Además de sus aplicaciones fotocatalíticas, diversos estudios han demostrado su uso como agente antimicrobiano, en bioingeniería, medicina y textiles (Vázquez y col., 2020).

Muñoz y colaboradores en 2021, sintetizaron NPsZnO a partir de los extractos de *Azadirachta indica* y *Aloe vera*, confirmando por microscopía electrónica de barrido la obtención de estas con tamaños de 200 y 300 nm. Posteriormente realizaron la impregnación de las NPs en telas de algodón, demostrando que, al ser impregnadas las NPsZnO en las telas presentan propiedades antibacterianas frente a *Staphylococcus aureus*.

Andrade y colaboradores en 2021, obtuvieron un nanocompuesto a base de tela no tejida de Nylon con NPsZnO, empleando un extrusor asistido con ultrasonido. Los ensayos antimicrobianos los realizaron con la técnica de difusión en agar (Kirby Bauer) y encontraron que estas telas poseen propiedades antimicrobianas frente a *Staphylococcus aureus* y *Candida albicans*.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

2.5 Mecanismos de acción de los agentes antimicrobianos

Generalmente son dos los mecanismos de acción de los agentes antimicrobianos en textiles, los cuales dependen de la manera en cómo actúan con los microorganismos.

2.5.1 Mecanismo de liberación controlada

Se refiere a que generalmente el agente antimicrobiano no está unido por enlaces químicos a las fibras del textil, si no que se da a través de la liberación gradual del compuesto químico desde el interior de las fibras hacia los alrededores, generalmente en presencia de humedad. La principal desventaja radica en que el agente liberado se agotará, por lo que el acabado no será efectivo en el momento en el que el agente este por debajo de las concentraciones mínimas inhibitorias y al someter el textil a lavado la actividad antimicrobiana desaparecerá (Salaum, 2016).

2.5.2 Ligados y/o de barrera

Son aquellos agentes antimicrobianos que están unidos químicamente al textil por medio de enlaces covalentes. Al aplicar agentes antimicrobianos estos quedan como una película o revestimiento creando a su vez una barrera física inerte sobre el textil impermeable a los microorganismos. Estos son resistentes al lavado frecuente y la actividad antimicrobiana se reducirá con el desgaste del textil (Salaum, 2016).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

2.6 Métodos de incorporación de agentes antimicrobianos en textiles

La adhesión depende de las características del agente antimicrobiano como del sustrato textil y se da a partir de diferentes tipos de interacciones: fisicoquímicas que dependen de la energía libre superficial de cada uno de los sustratos; interacciones mecánicas, debido al entrelazamiento de cadenas poliméricas y formación de enlaces covalentes entre agentes antimicrobianos (nanopartículas) y el sustrato textil (Cabello y col., 2019).

Existen diversos métodos para la modificación de la superficie de los textiles, algunos se basan en la activación de la superficie textiles para crear sitios reactivos que puedan formar enlaces con el agente antimicrobiano, por ejemplo, los tratamientos con plasma o la irradiación con luz ultravioleta. Otros métodos consisten en el recubrimiento previo de la superficie con un polímero que se adhiera permanentemente al textil, formando una plataforma reactiva (Cabello y col., 2019).

El proceso de acabado textil convencional “foulard-secado-curado” (pad-dry-cure) se utiliza también como tratamiento del textil con dispersiones coloidales para la aplicación de nanopartículas sobre la superficie textil. Este método consiste en la inmersión del tejido en la dispersión de nanopartículas seguido del paso del tejido por el foulard. El fourlad consiste en unos rodillos que eliminan el exceso del liquido correspondiente al baño de impregnación y homogeneiza la superficie. Este proceso normalmente se lleva a cabo mediante la aplicación de alta temperatura, la cual induce la reacción química o favorece el

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

entrelazamiento de las cadenas poliméricas en la interfase nanopartícula-sustrato, mejorando así la adhesión de las nanopartículas sobe la superficie del textil (Cabello y col., 2019).

3. CONCLUSIÓN

A pesar de que existen normas para el adecuado lavado de insumos y material en hospitales, las infecciones intrahospitalarias son una problemática que actualmente se sigue presentando. Debido a esto nacen los textiles con propiedades antimicrobianas, puesto que se necesitan telas con estas propiedades para fabricar cubrebocas, batas, vestimenta quirúrgica, apósitos, entre otros, de manera que sirvan como una alternativa para contrarrestar a los patógenos causantes de las infecciones intrahospitalarias.

Los textiles con propiedades antimicrobianas se están posicionando como un material interesante para su aplicación en hospitales, por sus múltiples beneficios. Se pueden obtener mediante el uso de diferentes agentes antimicrobianos como algunos tipos de nanopartículas debido a que estas presentan propiedades antimicrobianas y al ser incorporados en telas, les brindan estas propiedades. No obstante, es necesario garantizar, el cumplimiento de su delimitado número de criterios de seguridad e inocuidad con el fin de garantizar las necesidades de los pacientes y médicos.

4. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas y al Posgrado en Ciencias y Tecnología de Materiales. De igual manera se agradece a

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

CONACYT por la beca otorgada con número 836035 a través del proyecto SEP-CONACYT Ciencias Básica 2017-2018 CB2017-2018 A1-S-44977.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, M., Ávila, C. A., Cabello, C., Cadenas, G., Esparza, S. C., Pérez, M. & Quiñones, Z. V. (2021). Non-woven fabrics base on nanocomposite Nylon 6/ZnO obtained by ultrasound-assisted extrusion for improved antimicrobial and adsorption methylene blue dye properties. *Polymers*, 13(11): 1-13. https://doi.org/10.3390/polym13111888

André, R. S., Zamperini, C. A., Mima, E. G., Longo, V. M., Albuquerque, A. R., Sambrano, J. R., Machado, A. L., Vergani, C. E., Hernándes, A. C., Varela, J. A. & Alongo, E. (2015). Antimicrobial activity of TiO_2:Ag nanocrystalline heterostructures: Experimental and theoretical insights. *Chemical Physics*, 459: 87-95. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemphys.2015.07.020

Arévalo, H., Cruz, R., Palomino, F., Fernández, F., Guzmán, E. & Melgar, R. (2003). Aplicación de un programa de control de infecciones intrahospitalarias en establecimientos de salud de la región San Martín. *Revista Perú Medica.* [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342003000200005

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Argueta, L., Arenas, M., Díaz, A., García, S. & García R. (2019). Propiedades antimicrobianas y citotóxicas de un adhesivo de uso ortodóncico adicionado con nanopartículas de plata. *Revista Interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 12(22): 59-71. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.62550

Arista, N., Lozano, J. J., García, V. H., Narváez, J. L., Garro, A. K., Zamora, L. E. & Hernández, D. (2019). Nosocomial infection due to Acinetobacter and its effect on a second level hospital. *Medicina Interna de México*, 35(4): 477-484. https://www.medigraphic.com/pdfs/medintmex/mim-2019/mim194b.pdf

Asensio, M. J., Hernández, M., Teruel, S. & Minvielle, A. (2018). Infecciones en el paciente crítico. *Medicina-Programa de Formación Médica*, 12(52): 3085-3096. DOI: 10.1016/j.med.2018.03.014. https://doi.org/10.1016/j.med.2018.03.014

Betancur, C., Hernández, V. & Buitrago, R. (2016). Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(4): 366-381. https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubinvbio/cib-2016/cib164g.pdf

Bockmühl, D. P., Schages, J. & Rehberg, L. (2019). Laundry and textile hygiene in healthcare and beyond. *Microbial Cell*, 6(7): 299-306. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6600116/

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Cabello, C., Caicedo, C., Melo, L., Andrade, M., Cruz, V. J. & Ávila, C. (2019). Revisión de métodos para la obtención de textiles técnicos. Textiles técnicos y su obtención. *Revista Iberoamericana de Polímeros y Materiales*, 20(3): 105-117. https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/06/2019-20-3-105-117-cabello-y-col.pdf

Carrillo, J., Castillo, L. & Méndez, C. (2021). Caracterización, síntesis y aplicaciones del Nylon. Tecnológico Nacional de México Campus Tijuana. [En línea]. Disponible en: https://ingenieriaindustrialitt.org/publicacion/semana-academica/article/view/102/73. Fecha de consulta: 24 de octubre de 2022.

Castañeda, F. & Valdespino, M. (2015). Prevalencia de infecciones nosocomiales en un hospital de segundo nivel de atención en México. *Revista Médica Instituto Mexicano Seguro Social*, 53(6): 686-90. http://revistamedica.imss.gob.mx/editorial/index.php/revista_medica/article/viewFile/98/235

Cruz, V. J., Ávila, C. A., Soriano, F., Valdez, J. A., Cabello, C., Vaca, F. & Anaya, L. F. (2018). Fibras antimicrobianas a base de nylon y nanopartículas de cobre: evaluación preliminar. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica*. DOI: 10.24254/CNIB.18.64. https://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/444/378

Cruz, M., Suárez, R., González, L., Ramírez, R., Castañeda, M. & Hernández, I. (2018). Actividad foto catalítica y antimicrobiana de nanopartículas de TiO_2 y Ce-TiO_2. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 4(4): 351-357.

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/8240/Actividad_fotocatalitica_2018.pdf?sequence=1

Del Rocío, E., Ávila, L. & Arroyo, O. (2017). Las nanopartículas de plata: mecanismos de entrada, toxicidad y estrés oxidativo. *Revista de Educación Bioquímica*, 36(2): 39-54. https://www.medigraphic.com/pdfs/revedubio/reb-2017/reb172b.pdf

Ebrahimzadeh, M. A., Naghizadeh, A., Amiri, O., Shirzadi, M. & Mortazavi. (2019). Green and facile synthesis of Ag nanoparticles using *Crataegus pentagyna* fruit extract for organic pollution dyes degradation and antibacterial application. *Bioorganic Chemistry*, 103425. https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2019.103425

Esteves, D.C., Pereira, V.C., Souza, J.M. & Keller, R. (2016). Influence of biological fluids in bacterial viability on different hospital surfaces and fomites. *American Journal of Infection Control*, 44(3): 311-314. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.09.033

Fajardo, A. (2017). Medición en epidemiología: prevalencia, incidencia, riesgo, medidas de impacto. *Revista Alergia México*, 64(1). https://doi.org/10.29262/ram.v64i1.252

García, J. C., Blanco, J. A., Fuentes, Y. V., Arciniegas, L. C., Arias, C. D. & Morales, B. D. (2020). Prevention and treatment of surgical site infections in neurosurgery: state of the art. *Latreia*, 33(1), 39-58. https://www.objnursing.uff.br/index.php/nursing/article/view/5379/html_1

Hitega. (2020). La tela de lana: sus principales características y usos. [En línea]. Disponible en: https://www.hitega.cl/blog/tipos-de-telas/la-tela-de-lana-sus-principales-caracteristicas-

y-

usos/#:~:text=La%20lana%20es%20una%20tela,extendido%20en%20la%20industria%20textil. Fecha de consulta: 22 de octubre de 2022.

Hui, X., Zhu, H. & Sun, G. (2016). Antimicrobial textiles for treating skin infections and atopic dermatitis. *Antimicrobial Textiles, Elsevier*: 287-303. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100576-7.00015-8

Iberoplast. (2019). Los diversos beneficios de la tela de polipropileno. [En línea]. Disponible en: https://www.iberoplast.pe/blog/beneficios-tela-polipropileno/. Fecha de consulta: 24 de octubre de 2022.

Jaguaco, D. & Bonilla. (2018). Incorporación de dióxido de titanio en telas para generar propiedades autolimpiables. Tesis de ingeniería. Escuela Politécnica Nacional. [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19189/1/CD-8570.pdf

Loayza, J. A., Sánchez, J. R. & Ortiz, A. P. (2020). Infecciones intrahospitalarias en el estudiante de medicina. *Revista de La Facultad de Medicina Humana*, 20(1): 171–172. http://www.scielo.org.pe/pdf/rfmh/v20n1/2308-0531-rfmh-20-01-171.pdf

Martínez, K. & Zavala, M. (2022). Infecciones asociadas a la atención de la salud. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Rio*, 9(17): 10-17. https://doi.org/10.29057/estr.v9i17.7943

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Mejía, M. L., Cuesta, D. P., Nela, M., Escobar, N. J., Galeano, B. J., Hoyos, L. M., Zapata, J., Ortiz, I. C. & Botero, L. E. (2019). Protocolos para caracterización de no tejidos conformados por nanofibras. [En línea]. Disponible en: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5880/Protocolos%20para%20caracterizaci%c3%b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Melchor, M. A., Mesta, L. & Martel, S. A. (2015). Aplicaciones de nanopartículas en textiles para el diseño de interiores. Revista Digital de la Universidad Autónoma de Chiapas. [En línea]. Disponible en: https://espacioimasd.unach.mx/index.php/Inicio/article/view/88/1197. Fecha de consulta: 17 de octubre de 2022.

Milagros. (2022). Una guía sobre telas de algodón. [En línea]. Disponibles en: https://www.crehana.com/blog/estilo-vida/tipos-tela-para-algodon/. Fecha de consulta: 22 de octubre de 2022.

Morales, G., Tapia, J., Báez, A., Quintero, V., Ramírez, V. & Munive, J. (2022). Infecciones nosocomiales que representan una amenaza apremiante para la salud pública. *Revista Universidad Autónoma de Puebla*, 8(23): 139-154. http://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/814/926

Muñoz, L., Campo, D., Hoyos, M., Obregon, M., Muñoz, J. & Giraldo, G. (2021). Síntesis verde de nanopartículas de ZnO con actividad antibacteriana para funcionalizar textiles de algodón. *Informador Técnico*, 85(2): 126-145. https://doi.org/10.23850/22565035.3645

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Ong, C. B., Ng, L. Y. & Mohammad, A. W. (2018). Areview of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mecganismos and applications. *Renewable and Systainable Energy Reviews*, 81: 536-551. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020

Pedro, J. J., Zavaleta, G. G., Félix, H. A., Jauregui, S. R., Saldaña, J. A., Mejía, E. V., Tafur, K. A. & Soto, C. M. (2022). Efecto antimicrobiano de las fibras *Vicugna pacos* "alpaca" funcionalizados con nanopartículas de plata. *REBIOL*, 42(1): 29-38. https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/4586/5019

Perera, S., Bhushan, B., Bandara, R., Rajapakse, G., Rajapakse, S. & Bandara, C. (2013). Morphological antimicrobial, durability, and physical properties of untreated and treated textiles using silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 436: 975-989. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.08.038

Pírez, C., Peluffo, G., Giachetto, G., Menchaca, A., Pérez, W., Machado, K., Cristoforone, N-, Alamilla, M.,Acosta, V., Bruneto, M., Assandri, M., Toscano, B., Telechea, H., Rompani, E., Morosini, F., Taboada, R., Notejane, M., Pacaluk, M., Pujadas, M., Cladera, P., Alqorta, G. & Varela, A. (2020). Concurso: Experiencias exitosas en la prevención y control de infecciones respiratorias. *Archivos de Pediatría del Uruguay*, 91(1): 57-59. http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?pid=S1688-12492020000700001&script=sci_arttext

Rojas, S. P., Galeas, S. G. & Guerrero, V. H. (2017). Improvement of silver nanoparticle impregnation on cotton fabrics using a binder. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(45): 109-119. https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n45.2017.6420

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Salaün, F. (2016). Microencapsulation technology for smart textile coatings. *Active Coatings for Smart Textiles*: 179–220. https://doi.org /10.1016/B978-0-08-100263-6.00009-5

Serna, M., Echeverría, L. & Osorio, A. (2017). Compuestos antimicrobiales para textiles y sus métodos de caracterización. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín,* 16(31): 33-54. https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a2

Shaheen, T. I., Naggar, M. E., Abdelgawad, A. M. & Heneish, A. (2016). Durable antibacterial and UV protections of in situ synthesized zinc oxide nanoparticles onto cotton fabrics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 83: 426-432. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.003

Shahid, I., Butola, B. S. & Mohammad, F. (2016). Silver nanomaterials as future colorants and potential antimicrobial agents for natural and synthetic textile materials. *RCS Advances*, 6(50): 44232-44247.

Siegel, J., Rhinehart, E., Jackson, M. & Chiarello, L. (2007). Guideline for isolation precautions: preventing transmission of infectious agents in healthcare settings. [En línea]. Disponible en: https://www.cdc.gov/infectioncontrol/pdf/guidelines/isolation-guidelines-H.pdf

Srisod, S., Motina, K., Inprasit, T. & Pisitsak, P. (2018). A green and facile approach to durable antimicrobial coating of cotton with silver nanoparticles, whey protein, and natural

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

tannin. *Progress in Organic Coatings*, 120: 123-131. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.03.007

Tieffemberg, I., Bonifacio, M., Etcheverry, C. & Villanueva, A. (2018). Nuevos campos de aplicación textil: indumentaria funcionalizada para la salud. Secretaria de investigación. [En línea]. Disponibles en: https://publicacionescientificas.fadu.uba.ar/index.php/actas/article/view/560/810

Torres, J., López, J., Chávez, N., Pérez, J. & Ramírez, J. (2021). Uso de nanopartículas de plata para el desarrollo de textiles funcionales. *Revista Internacional de Ingeniería Industrial*, 2(2): 36-46. http://www3.fi.mdp.edu.ar/otec/revista/index.php/AACINI-RIII/article/view/43/26

Vargas, D. (2015). Carga mundial de infecciones asociadas a la atención sanitaria. *Organización Mundial de la Salud.* [En línea]. Disponibles en: http://www.who.int/gpsc/country _work/burden_hcai/es/. Fecha de consulta: 01 de octubre de 2022.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Vázquez, A. R., Vega, A. L. & Paz, B. (2020). Mecanosintesis y efecto antimicrobiano de óxidos metálicos nanoestructurados. Mundo nano. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 11(21). https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2018.21.62545

Vermeil, T., Peters, A., Kilpatrick, C., Pires, D., Allegranzi, B. & Pittet, D. (2018). Higiene de manos en hospitales: anatomía de una revolución. *Revista de infección hospitalaria*, 101 (4): 383-392.

Vilca, J., Rodríguez, J. & Philco, P. (2020). Factores de riesgo asociados a infecciones intrahospitalarias en pacientes críticos. *Revista Médica la Paz*, 26(1): 9-17. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-89582020000100002

Zamora, M. B., Edecio, D., Zamora, S. & Pérez, V. M. (2015). Infección nosocomial. Un importante problema de salud a nivel mundial. *Revista Latinoamericana de Patología Clínica y Medicina de Laboratorio*, 62(1): 33– 39. https://www.medigraphic.com/pdfs/patol/pt-2015/pt151f.pdf

Zamora, E. J., Masaquiza, D. A., Gallegos, F. A. & Mayorga, R. (2018). La infección nosocomial. Un reto en las unidades de cuidados intensivos. *Enfermería investiga, Investigación, Vinculación, Docencia y Gestión*, 3(1). http://dx.doi.org/10.29033/ei.v3sup1.2018.05.

Zapata, J., Botero, L., Mejía, M., Escobar, N., Ortiz, I., Galeano, B., Hoyos, L. & Cuesta, D. (2018). Textiles funcionales como barrera de protección ante infecciones asociadas a la

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 6 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

atención en salud. *Revista EIA (Escuela Ingeniería Antioquia),* 15(29): 13-29. https://doi.org/10.24050/reia.v15i29.1166

Zarzuela, R. (2020). Nanomateriales multifuncionales biocidas y superhidrofóbicos para su uso en textiles antimicrobianos y antimanchas. *Boletín Proyectos IMEYMAT*. [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/wendy/Downloads/manufr,+ram%C3%B3n+zarzuela.pdf. Fecha de consulta: 03 de octubre de 2022. https://revistas.uca.es/index.php/b-imeymat/article/view/8554/8586

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Aprovechamiento de residuos para la obtención de un biomaterial: Hidroxiapatita

Waste utilization to obtain a biomaterial: Hydroxyapatite

Flores Valdez Juanita Daria[1*], Sáenz Galindo Aidé[1], López Badillo Claudia M[1], Avalos Belmontes Felipe[1], Acuña Vazquez Pablo[2].

[1]Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autonoma de Coahuila. Unidad Saltillo. Blvd. Venustiano Carranza 935, República, 25280 Saltillo, Coahuila, México.

[2]Centro de Investigación en Química Aplicada. Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, 25294 Saltillo, Coahuila, México.

Autor de correspondencia*:
Juanita Daria Flores Valdez
email: juanitaflores@uadec.edu.mx
Tel: 8442208491
ORCID: 0000-0002-7068-7480

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

Actualmente se busca reducir el impacto ambiental que se ha generado a lo largo de los años. Por lo que el uso de materiales de desechos procedentes de fuentes naturales se encuentra en auge, debido a que estos son importantes para la extracción, recuperación y producción de materiales valiosos, como pueden ser los materiales biobasados. La hidroxiapatita (Ha) es el biomaterial más utilizado como implantes y reemplazo de tejido óseo gracias a su excelente osteoconducción y biocompatibilidad con el tejido óseo humano. Esta puede obtenerse mediante residuos naturales como huesos de animales, fuentes biogénicas, fuentes vegetales, fuentes marinas, etc. En este trabajo se aborda la obtención de Ha mediante las fuentes naturales más comúnmente utilizadas a partir de diferentes métodos y técnicas.

Palabras clave: Residuos, Biomaterial, Hidroxiapatita, Material biobasado.

Abstract

Currently, the environmental impact generated over the years is being reduced. Therefore, the use of waste materials from natural sources is growing because they are important for the extraction, recovery, and production of valuable materials by means of specific techniques and methods. Bio-based materials are an example of this. Hydroxyapatite (Ha) is the most widely used biomaterial for implants and bone tissue replacement due to its excellent osteoconduction and biocompatibility with human bone tissue. It can be obtained from natural residues such as animal bones, biogenic sources, vegetable sources, marine sources, etc. This paper covers obtaining Ha by means of the most commonly used natural sources using different methods and techniques.

Key words: Waste, Biomaterial, Hydroxyapatite, Bio-Based material.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

I. Introducción

El creciente deterioro de los ecosistemas ha elevado la preocupación sobre el cuidado del medio ambiente. Por lo que, diversas organizaciones e investigadores se han dado a la tarea de desarrollar estrategias para la obtención de materiales a partir de residuos y recursos naturales renovables, denominados materiales biobasados (Zhu y col., 2013).

Los materiales biobasados se han considerado como una posible solución a las problemáticas ambientales que se viven, gracias a la creciente concientización del cuidado del medio ambiente (Bedian y col., 2017). Estos se han llegado a utilizar desde la industria alimentaria hasta la producción de artículos de alto valor en el área de la biomedicina y farmacéutica (Si y Xu, 2020). En la **Figura 1** se presenta un esquema general para la obtención de un material biobasado.

Figura 1. Representación general de la obtención de un material biobasado.

Los residuos agroindustriales son una fuente interesante para la obtención de biomateriales, debido a que se pueden llegar a obtener diferentes productos dándoles un tratamiento adecuado (Gutiérrez y col., 2017). Algunos de los residuos agroindustriales que presentan altos contenidos de calcio son los huesos de bovinos, huesos de pescados, cáscaras de huevo de aves, etc. Estos, al darles un tratamiento térmico, pueden ser empleados para la síntesis de hidroxiapatita (Ha). Se ha reportado que la Ha obtenida por estos medios aumenta su

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

biocompatibilidad, osteoconducción y similitud con los huesos y dientes humanos (Sathiyavimal y col., 2020).

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica acerca de las diferentes fuentes naturales que se han utilizado para la obtención de Ha, así como sus generalidades. Con la finalidad de que el lector comprenda algunos de los diferentes métodos de obtener este biomaterial por medio de fuentes naturales, siendo así, una vía amigable con el medio ambiente.

II. ¿Qué es un biomaterial?

Aquel material que, al estar en contacto directo con el cuerpo humano y con el tejido vivo, no causa ningún daño, es denominado biomaterial (Ratner y Bryant, 2004). También son llamados materiales biocompatibles y pueden estar conformados a partir de materiales cerámicos, metálicos, poliméricos o combinaciones de estos (Sastre y col., 2004). Algunas de las cualidades que deben cumplir este tipo de materiales son:

- No producir respuesta del sistema inmune
- No ser tóxico
- No ser carcinogénico
- Ser compatible medicamente
- Ser compatible hemodinámicamente (no aumentar el flujo de presión sanguínea ni frecuencia cardiaca).

En otras palabras, un biomaterial es aquel material aceptado por los tejidos del organismo. Algunos de los usos principales de los biomateriales son en prótesis e implantes para el cuerpo humano o animal (Amor, 2005). En la **Figura 2** se representan algunas de las aplicaciones más comunes de los biomateriales.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

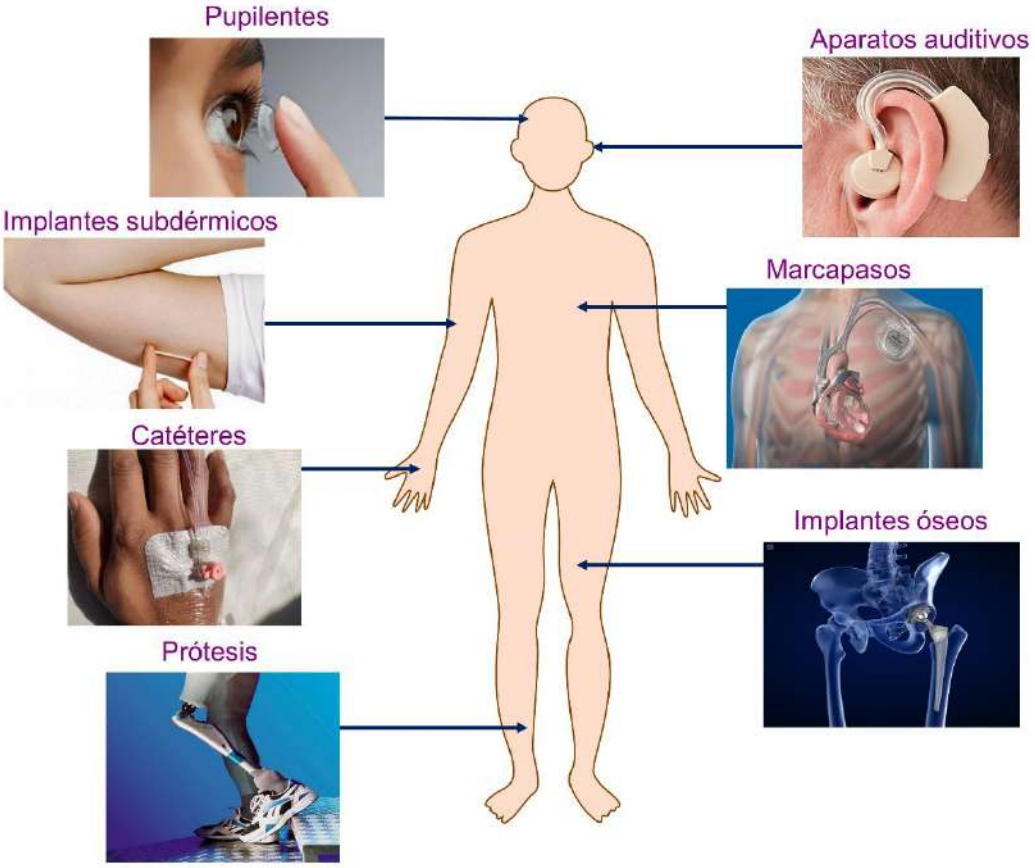


Figura 2. Aplicaciones de los biomateriales.

III. Hidroxiapatita

El esqueleto humano promedio se encuentra compuesto por aproximadamente el 40 % de estructura ósea con tamaño y forma definida. Tiene la finalidad de cumplir con funciones específicas como lo es la protección de órganos vitales, almacenamiento de minerales, soporte del cuerpo, facilitar el movimiento, etc. (Flores y col., 2022).

El hueso humano es un tejido compuesto por dos fases, la primera es la orgánica con un 30 % compuesta principalmente de colágeno, mientras el porcentaje restante corresponde a la fase inorgánica, siendo el componente principal de esta la Ha, la **Figura 3** representa, de manera general, la composición química del hueso humano.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

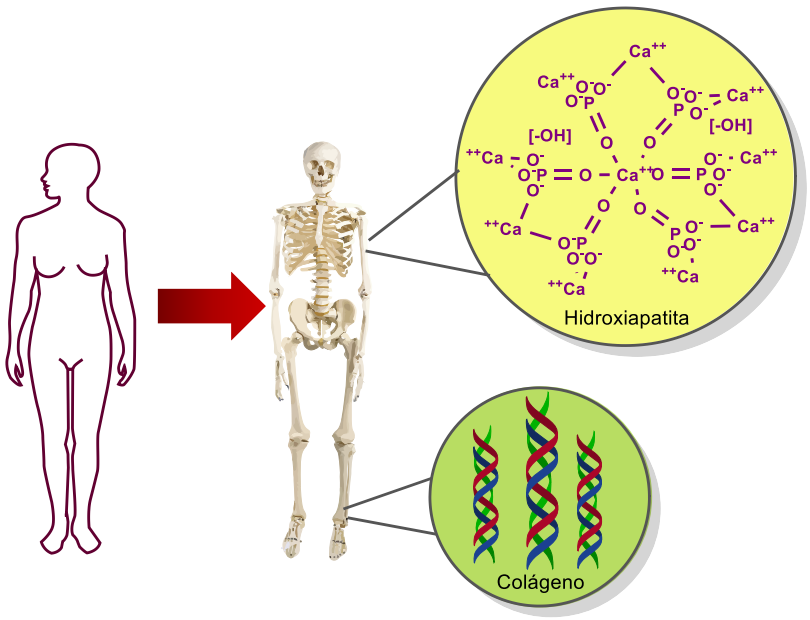


Figura 3. Esquema general de la composición de los huesos humanos.

La Ha es un fosfato de calcio básico, el cual es el material inorgánico predominante en los huesos y dientes humanos. Tiene como fórmula química $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, y presenta un sistema cristalino hexagonal. Comúnmente, llega a tener tamaños de partícula entre 1-5 nm, teniendo así una gran área superficial, además de un punto de fusión superior a los 1600 °C (Rahavi y col., 2017). La Ha es el material por excelencia para ser empleado en una gran variedad de aplicaciones en el área biomédica, por ejemplo, como implante óseo, recubrimiento de prótesis metálicas, liberadores de fármacos, etc. Esto gracias a las propiedades que posee de biocompatibilidad, biodegradabilidad, nula toxicidad, no inmunogenicidad y osteoconductividad (capacidad de proporcionar una superficie biocompatible apta para hacer migrar y crecer el tejido óseo) (Trakoolwannachai y col., 2019; Swetha y col., 2010; Joschek y col., 2000).

Para la síntesis de Ha se han desarrollado diversas metodologías, mediante métodos de hidrolisis, precipitación, hidrotermales, sol-gel y reacción en estado sólido (Mondal y col., 2012), entre ellos, la vía de precipitación es la más utilizada gracias a su bajo costo, simplicidad y su potencial aplicación a nivel industrial (Rincón y col., 2007). Además, la Ha

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

puede ser obtenida a partir de fuentes naturales como huesos de origen animal, cáscaras de huevo, conchas, corales, etc., mediante tratamientos térmicos como la calcinación. Se ha reportado que la Ha obtenida de fuentes naturales ha demostrado tener una mayor biocompatibilidad y osteoconductividad (Ramesh y col., 2016).

IV. Fuentes naturales de obtención de hidroxiapatita

La Ha obtenida de fuentes naturales tiene una estructura porosa, lo que permite un crecimiento más rápido de las células óseas. Además, presenta ventajas como sustituto óseo debido a que no presenta respuestas adversas en el individuo (Lim y col., 2014). En los siguientes apartados se describe la obtención de Ha a partir diferentes fuentes naturales, así como su potencial aplicación. La **Figura 4** resume las fuentes naturales, así como los procesos, comúnmente empleados para la obtención de Ha.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

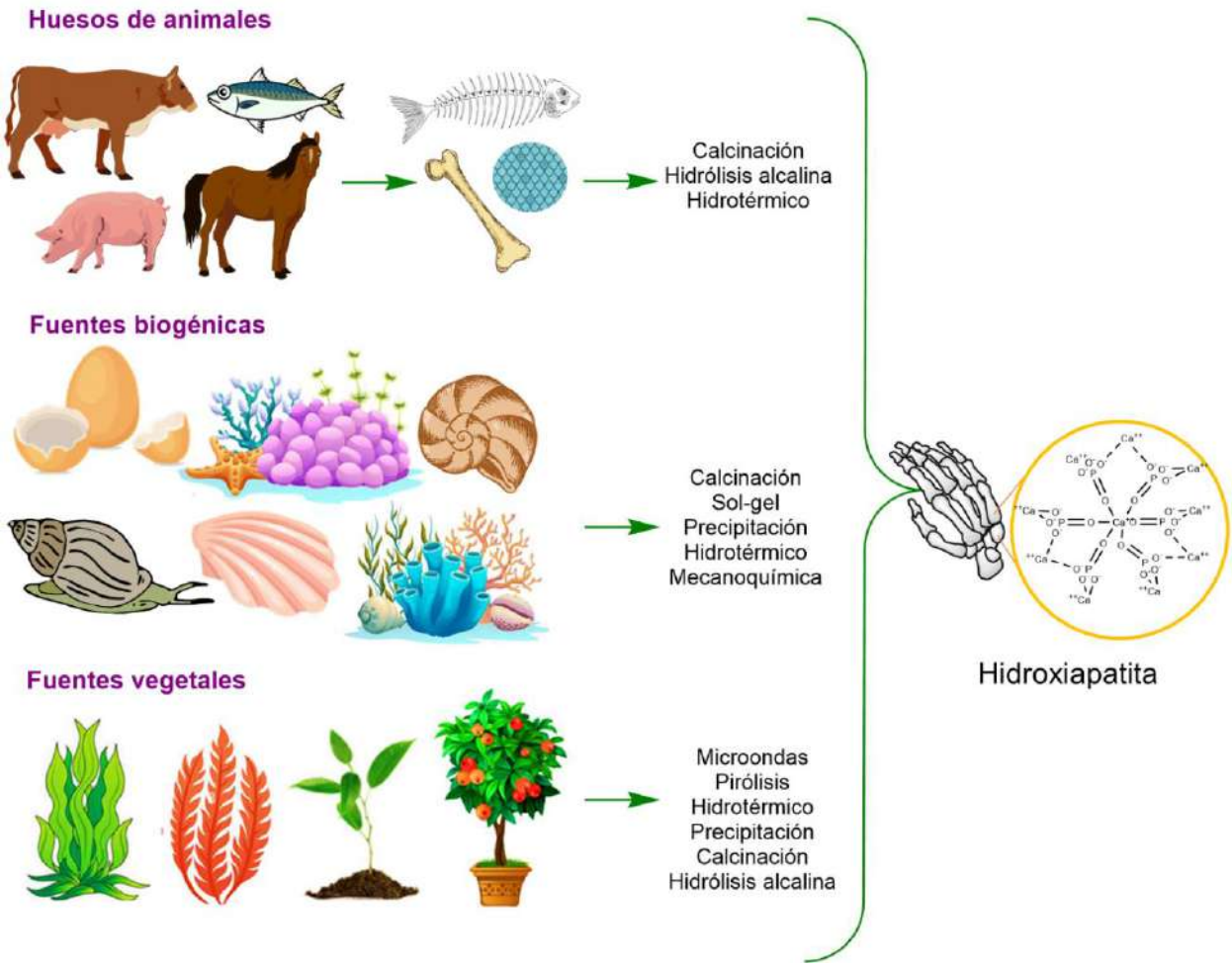


Figura 4. Fuentes naturales para la obtención de Ha.

4.1 Huesos

La Ha sintética es considerada como un biomaterial estequiométrico con una relación de Ca/P de 1.67. Mientras que la Ha extraída a partir de huesos de animales es un material no estequiométrico debido a la presencia de elementos traza como el Mg, Na, etc. Por lo que, es considerada óptima como material de injerto óseo (Hiller y col., 2003).

4.1.1 Huesos de bovinos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Entre las diferentes fuentes de mamíferos, la extracción de Ha a partir de los huesos de bovinos ha sido frecuentemente más reportada en la literatura, en comparación con otras fuentes como el cerdo, caballo, camello, etc. (Mohd y col., 2019).

La Ha obtenida a partir de bovinos ha sido empleada desde hace más de 60 años. Se suele utilizar el hueso femoral, ver **Figura 5**, gracias a que su morfología y estructura son similares a la del hueso humano (Herlianshyah y col., 2007).

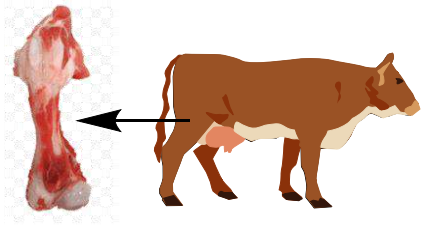


Figura 5. Hueso femoral de bovino.

Normalmente se obtiene la Ha por medio de calcinación a altas temperaturas (700-1200 °C) (Bermúdez y col., 2021). Generalmente, antes de proceder a la extracción de la Ha, se realiza un pretratamiento del hueso (Ruksudjarit y col., 2008), que consiste en lavar y eliminar la suciedad, grasas, proteínas, tejidos blandos, etc. Utilizando disolventes como agua, acetona, cloroformo, soluciones de NaOH, etc. (Barakat y col., 2009; Hosseinzadeh y col., 2014). Generalmente las propiedades como su cristalinidad, pureza y tamaño de partícula de la Ha obtenida mediante esta fuente están influenciados por la técnica de extracción, la temperatura de calcinación y la naturaleza de los huesos (Muhammad y col., 2014).

La extracción de Ha del hueso de bovino es biológicamente segura, además de ser económica (Mondal y col., 2012). En la **Tabla 1** se describen trabajos recientes sobre el tiempo y temperatura de extracción de Ha a partir de huesos de bovinos, además de sus potenciales aplicaciones.

Tabla 1. Extracción de Ha a partir de huesos de bovinos.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Temperatura de calcinación y tiempo de extracción	Relación molar Ca/P	Potencial aplicación	Referencia
650-1250 °C por 3 h.	1.67	Relleno maxilofacial.	Rana y col., 2017
600-1000 °C por 2 h.	1.67	Injerto óseo y andamios.	Ramesh y col., 2018.
750 °C por 6 h.	1.67-1.83	Implantes dentales y reemplazo de tejido óseo.	Odusote y col., 2019.
800-1000 °C por 2 h.	--	Implantes	Budiatin y col., 2020.
900 °C, inmediatamente se pasó a un baño a 4 °C.	1.87	Andamios, reemplazo de tejido óseo, prótesis.	Tran y Bui, 2021.
600 °C por 5 h.	--	Desarrollo de apósitos y material de implante.	Seok y col., 2022.

4.1.2 Porcinos

La Ha de origen porcino, comúnmente, se consigue del hueso cortical del cerdo. La composición química de los huesos de porcinos es muy similar a la del hueso humano, presenta dos fases una inorgánica (Ha) y orgánica (colágeno), donde la fase orgánica es la que permite la flexibilidad, elasticidad y resistencia (Nannmark y Sennerby, 2008). Para obtener la Ha a partir de esta fuente, es necesario el proceso de calcinación (entre los 600 a 1200 °C), para poder eliminar la materia orgánica presente en los huesos (Xiaoying y col., 2007).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

En 2017 Ramirez y su equipo de trabajo sintetizaron Ha porosa y cristalina, empleando fémur de porcinos con diferentes temperaturas de calcinación entre los 600-1000 °C (Ramirez y col., 2017). Un año más tarde Ofudje y compañía utilizaron el hueso cortical del cerdo para obtener Ha. Para esto llevaron a cabo un pretratamiento del hueso con una mezcla de NaOH/HCl, para posteriormente calcinarlo a diferentes temperaturas (600-1000 °C). Observaron que a una mayor temperatura de calcinación incrementaba la cristalinidad y porosidad de la Ha, por lo que puede ser empleada en como implante óseo (Ofudje y col., 2018). En ese mismo año Forero y colaboradores, realizaron una comparación entre Ha sintética y Ha obtenida del fémur de porcinos. Reportando que la Ha natural exhibía mejores propiedades estructurales, con una alta cristalinidad (Forero y col., 2018). Un par de años más tarde, Rabei y colaboradores, reportaron la obtención de Ha a partir de huesos de porcinos utilizando una temperatura de calcinación de 950 °C por 2 h. Y encontraron que el biomaterial final presentó un sistema cristalino hexagonal, una densidad de 3.14 g/cm^3 y un tamaño de partícula entre 50-100 nm (Ribei y col., 2020).

4.1.3 Equinos

Los huesos de equinos (caballos) como la columna y la tibia pueden ser utilizados para la obtención de Ha. Al igual que en los bovinos y porcinos, se lleva a cabo un pretratamiento, para eliminar la materia orgánica presente, seguido de calcinación entre 900-1300 °C, para conseguir Ha lo más pura posible (Bermúdez y col., 2021). En los últimos años se han reportado diversas investigaciones respecto a las características físicas, químicas y biológicas de esta Ha. A continuación se describen algunas de las metodologías y/o propiedades de la Ha obtenida a partir de equinos.

En el año 2016 Labate y colaboradores, evaluaron Ha proveniente del fémur y húmero de caballo, reportando que no existe diferencia significativa entre ambas, además de presentar características similares al hueso humano, siendo aptas para su uso en aplicaciones biomédicas como regenerador de tejido óseo (Labate y col., 2016). Años más tarde, en el 2020 Jeong y su equipo de trabajo, utilizaron Ha a partir de equino para recubrir un material

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

de titanio (Ti6Al4V) y encontraron que el biomaterial final posee una excelente biocompatibilidad y bioactividad (Jeong y col., 2020). Un año más tarde Lim y colaboradores desarrollaron un compósito por medio de electrohilado de Ha, a partir de huesos de equinos, y policaprolactona. Reportando que el biomaterial final presentó una excelente viabilidad celular y diferenciación osteogénica (Lim y col., 2021). En ese mismo año Chul y colaboradores desarrollaron un nuevo portador genético utilizando Ha natural de huesos de equinos, reportando que este biomaterial inducia a la diferenciación osteogénica, por lo que se puede utilizar en regeneración de tejido óseo (Chul y col, 2021).

4.1.4 Pescados

Debido a la alta demanda en el consumo de pescado ha provocado un aumento significativo en la producción de residuos de escamas y espinas (Akram y col., 2014). A estas se les puede dar un segundo uso para obtener Ha, debido a que estas contienen en su composición química calcio, fosfatos y carbonatos (Mohd y col., 2019).

Para este fin se han utilizado diferentes especies de pescados como la anchoa, barramundi, carpa, la sepia, bacalao, congrio, pez volador, tiburón, lubina, dorado, pez espada, pez ballesta, salmón, atún, entre otros (Terzioğlu y col., 2018). El pretratamiento de las espinas y escamas generalmente consiste en eliminar los restos de carne con ebullición o bien utilizando soluciones ácidas de HCl para la desproteinización y por último son cortados y pulverizados (Mohd y col., 2019). La **Tabla 2** presenta síntesis realizadas para la obtención de Ha a partir de escamas y espinas de pescado.

Tabla 2. Ha obtenida a partir de residuos de pescado.

Tipo de pescado	Método de síntesis	Relación molar (Ca/P)	Propiedades	Aplicación	Referencia

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Trucha, bacalao y salmón	Calcinación (650 °C, 5 h)	1.47, 1.88 y 1.51,	Alta cristalinidad, buena adhesión y proliferación celular.	Regeneración de tejido óseo	Shi y col., 2018.
Bagre, tilapia, lubina y atún	Calcinación (700 °C, 1 h)	1.8	Alta porosidad con un tamaño de partícula entre 50-70 nm	Aplicaciones biomédicas	Viet y col., 2019.
Atún	Calcinación (700, 900 y 1000 °C, 3 h)	1.67	Tamaño de partícula 200 nm con forma esférica	Aplicaciones biomédicas	Latif y col., 2020.
Arawana	Calcinación (600-800 °C, 2 h)	1.67	Alta pureza, viabilidad celular del 95 %	Implantes óseos y dentales	dos Santos y col., 2021.
Barramundi	Calcinación	1.84	No presentó citotoxicidad en ratones ni conejos	Reemplazo de tejido óseo	Le y col., 2022

4.2 Fuentes biogénicas

Las fuentes biogénicas son materiales producidos por organismos vivos. Algunas de estas fuentes son ricas en calcio (específicamente $CaCO_3$) y son excelentes opciones para obtener Ha, gracias a que se consideran biocompatibles con el cuerpo humano. Entre ellas se encuentran las cáscaras de huevo, conchas, corales, algas, etc (Oladele y col., 2018).

4.2.1 Cáscaras de huevo

Cada año, entre los criaderos, casas, restaurantes, panaderías, etc., se genera poco más de un millón de toneladas de cáscaras de huevo. Por lo que, este desecho es considerado como un material barato y de fácil acceso (Akram y col., 2014).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

La composición química de las cáscaras de huevo es aproximadamente 93 % calcio, 0.9 % magnesio, 0.9 % fosforo, 1.6 % agua y 3.3 % proteínas y lípidos (Arias y col., 1991; King'ori, 2011). Gracias a su alto contenido en calcio, las cáscaras de huevo pueden ser utilizadas para para la obtención de Ha. Generalmente, son lavadas con agua destilada para remover restos del contenido interno del huevo y posteriormente se llevan a calcinación entre 700 a 1000 °C para obtener CaO (ver ec. 1-3) (Mohd y col., 2019). Las principales técnicas de obtención de Ha a partir de este residuo son precipitación, sol-gel y mecanoquímica (Zhu y col., 2017).

$$CaCO_3 \xrightarrow{\Delta} CaO + CO_2 \qquad \text{(ec.1)}$$

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \qquad \text{(ec. 2)}$$

$$10Ca(OH)_2 + 6H_3PO_4 \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 18H_2O \qquad \text{(ec. 3)}$$

Kattimani y colaboradores utilizaron cáscaras de huevo de gallina para sintetizar Ha, como primer paso las lavaron con agua destilada en ebullición, posteriormente realizaron el complejo $CaCO_3$-EDTA y lo hicieron reaccionar con Na_2HPO_4, todo esto con radiación de microondas. La Ha obtenida presentó un tamaño de partícula entre 100-200 nm, este biomaterial fue evaluado clínicamente en 20 pacientes mostrando prometedores resultados para la regeneración de tejido óseo (Kattimani y col., 2019). Por otro lado, Nurifana y colaboradores obtuvieron Ha a partir de cáscaras de huevo de pato mediante el método de precipitación. Las cáscaras fueron lavadas con agua destilada y calcinadas a 1000 °C por 3 h. El biomaterial obtenido presentó una relación molar Ca/P de 1.77, sistema cristalino hexagonal monofásico (Nurifana y col., 2020). Kalbarczyk y su equipo de trabajo realizaron la síntesis de Ha a partir de cascaras de huevo de pato, codorniz, gallina y paloma, encontrando una relación molar Ca/P de 1.4, 1.1, 1.35 y 1.6 respectivamente, demostrando ser aptas para su aplicación biomédica (Kalbarczyk y col., 2020).

4.2.2 Corales

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

La arquitectura natural de los corales les permite ser candidatos ideales para obtener Ha ya que mejora la osteoconducción, esto gracias a que presentan una porosidad muy cercana a la del hueso humano, además de, propiedades mecánicas, osteoconductoras y biorreabsorbibles adecuadas (Vecchio y col., 2007; Nandi y col., 2015). Generalmente, la conversión del coral a Ha se realiza a través del proceso de precipitación o hidrotérmico con altas temperaturas y presiones, permitiendo así, mantener la estructura original del coral (Xu y col., 2001; Macha y col., 2013).

Choi y su equipo de trabajo sintetizaron Ha a partir del coral *Porites* sp mediante un proceso hidrotérmico a 350 °C, obteniendo un biomaterial con un tamaño de partícula de 20 µm y una alta porosidad con una potencial aplicación en la liberación controlada de fármacos (Choi y col., 2017). Un par de años más tarde Siswanto y colaboradores obtuvieron Ha a partir de corales mediante el método de sol-gel, consiguiendo un tamaño de partícula de 55 nm con una cristalinidad del 77 % (Siswanto y col., 2019a), posteriormente realizaron andamios porosos empleando la Ha a partir de corales y colágeno. Y encontraron que tanto la Ha como el compósito demostró tener una viabilidad celular por encima del 100 % siendo un biomaterial apto para la regeneración de tejido óseo (Siswanto y col., 2020b).

4.2.3 Conchas

Al igual que las cáscaras de huevo, las conchas tienen en su composición química más del 90 % de $CaCO_3$, y al darles un tratamiento adecuado se puede obtener Ha (Hembrick y col., 2020). En los últimos años se ha reportado la síntesis de Ha a partir de conchas de ostras, almejas, ostiones, mejillones, caracol, etc. La **Tabla 3** presenta algunas de las síntesis que se han llevado a cabo, resumiendo el pretratamiento, método de obtención, relación molar y potenciales aplicaciones.

Tabla 3. Obtención de Ha a partir de diferentes conchas.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Concha	Método de obtención	Propiedades	Aplicación	Referencia
Ostra	Mecanoquímica + tratamiento térmico	Cristalinidad del 96.3 % con una alta pureza	Injertos y andamios	Wu y col., 2017.
Caracol	Precipitación	Acelera la curación ósea del hueso mandibular en conejos	Reemplazo de injerto óseo	Alhussary y col., 2020.
Almeja	Precipitación húmeda	Alta bioactividad y biocompatibilidad con células de osteoblastos.	Andamios	Hembrick y col., 2020.
Almeja	Precipitación	Formación de tejido óseo a los 14 días de inmersión en fluido fisiológico simulado	Injerto de tejido óseo	Kumar y col., 2020.
Mejillón	Precipitación	No presentó citotoxicidad en las células epiteliales y h-MSCs	Reemplazo de injerto óseo	Bassyouni y col., 2020.
Almeja	Hidrotérmico	Sistema cristalino hexagonal, tamaño de partícula entre 10-50 nm	Aplicaciones biomédicas	Kusuma y col., 2021.

4.3 Fuentes vegetales

Gracias a que los investigadores intentan desarrollar/producir biomateriales a partir de recursos naturales, han utilizado fuentes vegetales para ello. Por ejemplo, la madera ha sido empleada para diseñar plantillas de andamios óseos gracias a que se compone de tubos huecos paralelos organizados, además de presentar una alta resistencia, rigidez, dureza y una baja densidad. Hoy en día han centrado su atención en el uso de fuentes vegetales ricas en calcio para la obtención de Ha (Castro y Huber, 2015).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Algunas especies marinas, como las algas, están compuestas de $CaCO_3$ cuya porosidad es similar a la de los huesos humanos, por lo que pueden ser utilizadas para producir estructuras de Ha (Walsh y col., 2008). Algunas de las plantas más comúnmente utilizadas para este fin son las algas rojas (*Phymatolithon calcareum*), incluso se ha llegado a reportar el uso de hojas y tallos del té verde, albahaca, menta, trébol, madera, cáscaras de naranja, papa, etc. (Mohd y col., 2019; Ageboh y col., 2020). Nayar y Guha desarrollaron Ha a partir de cáscara de naranja, papa, papaya seca y flor de caléndula, mezclando cada uno de estos con una solución alcalina de $Ca(NO_3)_2$ tetrahidratado, después de incubarlo por 24 h se añadieron 400 mL de solución alcalina de $(NH_4)_2HPO_4$ dejando en agitación por una semana, pasado este tiempo el precipitado obtenido fue filtrado y lavado hasta un pH neutro, abriendo así, el panorama para la obtención de Ha a partir de desechos (Nayar y Guha, 2009). Sundrarajan y su equipo de trabajo utilizaron un extracto de la flor de *Moringa oleífera* como agente quelante durante la síntesis de Ha, resultando en un material biológicamente apto para ser utilizado en la ingeniería de tejidos (Sundrarajan y col., 2015). Choi y colaboradores obtuvieron Ha a partir del alga *Halimeda* sp mediante un método hidrotérmico, el análisis de FTIR, DRX y SEM confirman la presencia de Ha con una sola fase cristalina (Choi y col., 2017). Temymouri utilizó los métodos de hidrólisis y mineralización hidrotérmica para la obtención de Ha a partir de microalgas (*Scenedesmus* sp), obteniendo un 80 % de rendimiento con un tamaño de partícula de 50 nm aproximadamente (Teymuori y col., 2018).

V. Conclusión

Esta revisión resume algunos de los métodos y recursos naturales utilizados en la síntesis de Ha. De forma general, la Ha es un biomaterial ampliamente utilizado en la biomedicina, y puede ser obtenida a partir de huesos de animales (bovino, porcino, equino, pescado, etc.), fuentes biogénicas (cáscaras de huevo, conchas, corales, etc.) y fuentes vegetales (algas, tallos, hojas, etc.). Siendo así, el uso de residuos una alternativa amigable con el medio ambiente para la obtención/desarrollo de materiales que beneficien a los seres humanos.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

VI. Agradecimientos

Al CONACYT por la beca 1078907 otorgada. Así como al apoyo brindado a través del Proyecto SEP-CONACYT Ciencias Básicas 2017-2018 CB2017-2018 A1-S-44977.

VII. Referencias

Agbeboh, N., Oladele, I., Daramola, O., Adediran, A., Olasukanmi, O. & Tanimola, M. (2020). Environmentally sustainable processes for the synthesis of hydroxyapatite. Heliyon. 6:1-13. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03765.

Akram, M., Ahmed, R., Shakir, I., Ibrahim, W. & Hussain, R. (2014). Extracting hydroxyapatite and its precursors from natural resources. *Journal of Material Science*. 49:1461-1475. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7864-x.

Alhusary, B., Taqa, G. & Taqa, A. (2020). Preparation and characterization of natural hydroxyapatite fon eggshell and seashell and its effect on bone healing. Journal of Applied Veterinary Sciences. 5:25-32. https://dx.doi.org/10.21608/javs.2020.85567.

Amor, A. (2005). Los materiales y su biocompatibilidad: hidroxiapatita. *Materiales Avanzados*. 4, 43-48.

Arias, J., Fernandez, M. & Caplan, A. (1991). Research note: absence from avian eggshell membranas of epitopes recognized by anti-keratin antibodies. *Poultry Science*. 70:1647-1650. https://doi.org/10.3382/ps.0701647.

Barakat, N., Seob, M., Omran, A., Sheikh, F. & Yong, H. (2009). Extraction of pure natural hydroxyapatite from the bovine bones bio waste by three different methods. *Journal of Materials Processing Technology*. 209:3408-3415. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.040.

Bassyouni, G., Eldera, S., Kenawy, S. & Hamzawy, E. (2020). Hydroxyapatite nanoparticles derived from mussel shels for in vitro cytotoxicity test and cell viability. *Heliyon*. 6:1-10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04085.

Bedian, L., Villalba, A., Hernández, G., Parra, R. & Iqbal, H. (2017). Bio-based materials with novel characteristics for tissue engineering applications – A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 98:837–846. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.048

Bermúdez, V., Huaman, K., Castañeda, J., Landuro, C., Quispe, J. & Tay, L. (2021). Obtención de hidroxiapatita a través de residuos biológicos para injertos óseos dentales. Revista Estomatológica Herediana. 31:111-117. https://doi.org/10.20453/reh.v31i2.3971.

Budiatin, A., MClinPharm, S., Pharm, M., MClinPharm, W., Ardianto, C. & Khotib, Junaidi. (2020). The Characterization of Bovine Bone-Derived Hydroxyapatite Isolated Using Novel Non-Hazardous Method. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*. 45:49-56. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.45.49.

Castro, P. & Huber M. (2015). Marine Biology, 10th edition. McGraw-Hill Higer Education, New York.

Choi, G., Karacan, I., Cazalbou, S., Evans, L., Sinutok, S. & Nissan, B. (2017). Conversion of calcified algae (*Halimeda sp*) and hard coral (*Porites sp*) to hydroxyapatite. *Key Engineering Materials*. 758:157-161. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.758.157.

Chul, M., Seonwoo, H, Jang, K., Pandey, S., Lim, J., Park, S., Kim, J., Hoon, Y., Garg, P. & Hoon, J. (2021). Development of novel gene carrier using modified nano hydroxyapatite derived from equine bone for osteogenic differentiation of dental pulp stem cells. *Bioactive Materials*. 6:2742-2751. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.01.020.

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Bhatnagar, N. (2020). Bio-Based Plastics: Materials and Applications (2nd ed.). arclepress.

dos Santos, M., Moura, F., Aguilar, M., Westin, C., Navarro, D. & Brant, J. (2021). In vitro evaluation of natural hydroxyapatite from *Osteoglossum bicirrhosum* fish scales for biomedical application. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 18:13846. http://dx.doi.org/10.1111/ijac.13846.

Forero, P., Segura, B., Galviz, B., Restrepo, E. & Arango, P. (2018). Comparative study between natural and synthetic hydroxyapatite: structural, morphological and bioactivity properties. *Revista Materia*. 23:1-17. https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0551.

Flores, J., Sáenz, A., López, C., Castañeda, A. & Acuña, P. (2022). Hydroxyapatite and Biopolymer Composites with Promising Biomedical Applications. *Mexican Journal of Biomedical Engineering*. 43:2, 6-23. https://www.rmib.mx/index.php/rmib/article/view/1245.

Gutierrez, P., Hernandez, M. & Huerta, B. (2017). The production of biomaterials froms agro-industrial waste. *Fresenius Environmental Bullet*. 26:4128-4152. https://researchgate.net/publication/317587933.

Hembrick, V., Samuel, T., Mohammed, Z., Jeelani, S. & Rangari, V. (2020). Ecofriendly production of bioactive tissue engineering scaffolds derived from egg- and sea-shells. *Journal of Materials Research and Technology*. 9:13729-13739. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.093.

Hiller, J., Thompsom, T., Evison, M., Chamberlian, A. & Wess, T. (2003). Bone mineral change during experimental heating: an X-ray scattering investigation. Biomaterials. 24:5091-5097. https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00427-7.

Herlianshyah, M., Nasution, D., Hamdi, M., Ide, A., Wildan, M. & Tontowi, A. (2007). Preparation and characterization of natural hydroxyapatite: a comparative study of bovine

bone hydroxyapatite and hydroxyapatite from calcite. *Materials Science Forum*. 561-565:1441-1444. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.561-565.1441.

Hosseinzadeh, E., Davarpanah, M., Nemati, N. & Tavakoli, S. (2014). Fabrication of hard tissue replacement using natural hydroxyapatite derived from bovine bones by termal descompsition method. *International Journal of Organ Transplantation Medicine*. 5:23-31.

Jeon, W., Shin, S. & Choi, H. (2020). Microestructure and mechanical properties of titanium-equine bone biocomposites. *Metals*. 10:581-591. http://dx.doi.org/10.3390/met10050581.

Joschek, S., Nies, B., Krotz, R. & Göpferich, A. (2000). Chemical and physicochemical characterization of porous hydroxyapatite ceramics made of natural bone. *Biomaterials*. 21:1645-1658. https://doi.org/10.1016/S0142-9612(00)00036-3.

Kalbarczyk, M., Szcześ, A., Kantor, I., May, Z. & Sternik, D. (2020). Syhtesis and characterization of calcium phosphate materials derived from eggshells from different poultry with and without the eggshell membrane. *Materials*. 15:934. https://doi.org/10.3390/ma15030934.

Kattimani, V., Lingamaneni, K., Yalamanchili, S. & Muralidhar, M. (2019). Use of eggsehll-derived nano-hydroxyapatite as novel bone graft substitute-A randomized controlled clinical study. Journal of Biomaterials Applications. 34:597-614. https://doi.org/10.1177/0885328219863311.

King'ori, A. (2011). A review of the uses of poultry egsshell and Shell membranas. *International Journal of Poultry Science*. 10:908-912.

Kumar, S., Dhanaraj, K., Vimalathithan, R., Ilaiyaraja, P. & Suresh, G. (2020). Hydroxyapatite for bone related applications derived from sea Shell waste bye simpleprecipitation method. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 8:2416-2429. https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1749373.

Kusuma, H., Sifah, L. & Anggita, S. (2021). The characterization of hydroxyapatite from blood clam shells and egg shells: Shyntesis by hydrothermal method. *Journal of Physiscs: Conference Series*. 1918:1-7. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1918/2/022040.

Khaoo, W., Nor, F., Ardhyananta, H. & Kurniawan, D. (2015). Preparation of Natural Hydroxyapatite from Bovine Femur Bones Using Calcination at Various Temperatures. *Procedia Manufacturing*. 2:196-201. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.034.

Labate, G., Baino, F, Terzini, M., Audenino, A., Vitale, C., Segers, P., Quarto, R. & Catapano, G. (2016). Bone structural similarity score: a multiparametric tool to match properties of biomimetic bone substitutes with their targer tissues. *Journal of Applied Biomaterials Functional Matter*. 26:277-289. https://doi.org/10.5301/jabfm.5000283.

Latif, A., Mohf, N., Ramli, N, Muhamad, M., Abdullah, H., Idris, M. & Lee, T. (2020). Extraction of biological hydroxyapatite from tuna fish bone for biomedical applications. *Materials Science Forum*. 1010:584-589. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.584.

Le, K., Ha, V., Pham, X., Nguyen, P., Phan, B., Doan, T. & Hue, T. (2022). Physicochemical properties, actue and subcronic toxicity of nano-hydroxyapatite obtained from *Lates calcarifer* fish bone. *Regional Studies in Marine Science*. 55:102560. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102560.

Lim, J., Jang, K., Son, H., Park, S., Eun, J., Bae, H., Seonwoo, H., Hoon, Y., Chul, M. & Hoon, J. (2021). Aligned nanofiber-guided bone regeneration barrier incorporated with equine bone-derived hydroxyapatite for alveolar bone regeneration. *Polymers*. 13:60-71. https://dx.doi.org/10.3390/polym13010060.

Lim, K., Woo, J., Kim, J. & Hoon, J. (2014). Development and evaluation of natural hydroxyapatite ceramics produced by the heat treatment of pig bones. *Journal of Biosystems Engineering*. 39:227-234. http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2014.39.3.227.

Macha, I., Ozyegin, L., Chou, J., Samur, R., Oktar, F. & Nissan, B. (2013). An alternative synthesis method for di calcium phosphate (monetite) powders from mediterranean mussel (Mytilus galloprovincialis) shells. *Journal of The Australian Ceramic Society*. 49:122-128.

Mohd, N., Koshy, P., Abdullah, H., Idris, M. & Lee, T. (2019). Syntheses of hydroxyapatite from natural sources. *Heliyon*. 5:1-14. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01588.

Mondal, S., Bardhan, R., Mondal, B., Dey, A., Mukhopadhyay, S., Roy, S., Guha, R. & Roy, K. (2012). Synthesis, characterization and in vitro cytotoxicity assessment of hydroxyapatite from different bioresources for tissue engineering application. *Bulletin of Materials Science*. 35:683-691. https://doi.org/10.1007/s12034-012-0346-y.

Muhammad, A., Ahmed, R., Shakir, I., Ibrahim, W. & Rafaqat, H. (2014). Extracting hydroxyapatite and its precursors from natural resources. *Journal of Materials Science*. 49:1464-1475. 10.1007/s10853-013-7864. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7864-x.

Nandi, S., Kundu, B., Mukherjee, J., Mahato, A., Datta, S. & Balla, V. (2015). Converted marine coral hydroxyapatite implants with growth factors: In vivo bone regeneration. *Materials Science and Engineering C*. 49:816-823. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.078.

Nayar, S. & Guha, A. (2009). Waste utilization for the controlled synthesis of nanosized hydroxyapatite. *Materials Science and Engineering*. 29:1326-1329. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2008.10.002.

Nurifana, F., Kadarwati, A. & Putra S. (2020). Syhtesis and characterization of hydroxyapatite from duck eggshell modified silver by gamma radiolysis method. *Journal of*

Physics: Conference Series. 1436:1-10. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012099.

Odusote, J., Danyuo, Y. & Baruwa, A. (2019). Synthesis and characterization of hydroxyapatite from bovine bone for production of dental implants. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*. 17:1-7. https://doi.org/10.1177/2280800019836829.

Oladele, I., Agbabiaka, O., Olasunkanmi, O., Balogum, A. & Popoola, M. (2018). Non-synthetic sources for the development of hydroxyapatite. Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering. 5:92-99. https://doi.org/10.15406/jabb.2018.05.00122.

Nannmark U. & Sennerby L. (2008). The bone tissue responses to prehydrated and collagenated cortico-cancellous porcine bone grafts: a study in rabbit maxillary defects. *Clinical Implant Densitry and Related Research*. 10:264-270. https://doi.org/10.1111/j.1708-8208.2007.00080.x.

Ofudje, E., Rajendran, A., Adeogun, A., Idowu, M, Kareem, S. & Pattanayak, D. (2018). Shyntesis of organic derived hydroxyapatite scaffold from pig bone waste for tissue engineering applications. *Advanced Powder Technology*. 29:1-8. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.09.008.

Ramesh, S., Natasha, A. N., Tan, C. Y., Bang, L. T., Ramesh, S., Ching, C. Y. & Chandran, H. (2016). Direct conversion of eggshell to hydroxyapatite ceramic by a sintering method. *Ceramics International*. 42:7824–7829. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.015

Ramesh, S., Loo, Z., Tan, C., Kelvin, W., Ching, Y., Tarlochan, F., Chandran, H., Krishnasamy, S., Bang, L. & Sarhan, A. (2018). Characterization of biogenic hydroxyapatite derived from animal bones for biomedical applications. Ceramics Internationals. 44:10525-10530. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.072.

Ramirez, C., Londoño, S., del Real, A., Mondragón, M. & Rodriguez, E. (2017). Effect of the temperature and sintering time on the thermal, structural, morphological, and vibrational properties of hydroxyapatite derived from pig bone. Ceramics International. 43:7552-7559. http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.03.046.

Rana, M., Akhtar, N., Rahman, S., Mohammad, H. & Asaduzzaman, S. (2017). Extraction of Hydroxyapatite from Bovine and Human Cortical Bone by Thermal Decomposition and Effect of Gamma Radiation: A Comparative Study. International Journal of Complementary & Alternative Medicine. 8:1-10. https://doi.org/10.15406/ijcam.2017.08.00263.

Ratner, B. & Bryant, S. (2004). Biomaterials: Where We Have Been and Where We Are Going. Annueal Review of Biomedical Engineering. 6:41-75. https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140027.

Rahavi, S., Ghaderi, O., Monshi, A. & Fathi, M. (2017). A comparative study on physicochemical properties of hydroxyapatite powders derived from natural and synthetic sources. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 58:276–286. https://doi.org/10.3103/S1067821217030178.

Ribei, M., Palevicius, A., Monshi, A., Nasiri, S., Vilkauskas, A. & Janusas, G. (2020). Comparing methods for calculating nano cristal size of natural hydroxyapatite using X-ray diffraction. *Nanomaterials*. 10:1-21. http://dx.doi.org/10.3390/nano10091627.

Rincón, M., Rodríguez, A., Londoño, M. & Echavarría, A. (2007). Fabricación y caracterización de una matriz tridimensional de hidroxiapatita macroporosa para aplicación en ingeniería de tejidos óseos. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*. 7:87-95.

Ruksudjarit, A., Pengpat, K., Rujijangul, G. & Tunkasiri, T. (2008). Synthesis and characterization of nanocrystalline hydroxyapatite from natural bovine bone. Current Applied Physis. 8:270-272. https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.10.076.

Sastre, R., de Aza, S. & San Román, J. (2004). Biomateriales para la salud. *Faenza Editice Ibérica, España, Portugal, Chile*. 197-218.

Sathiyavimal, S., Vasantharaj, S., LewisOscar, F., Selvaraj, R., Brindhadevi, K. & Pugazhendhi A. (2020). Natural organic and inorganic–hydroxyapatite biopolymer composite for biomedical applications. *Progress in Organic Coatings*. 147:105858. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105858

Seok K., Sathiyaseelan, A., Saravanakumar, K. & Hyeon, M. (2022). Wound healing efficacy of biocompatible hydroxyapatite from bovine bone waste for bone tissue engineering application. Journal of Environmental Chemical Engineering. 10:106888. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106888.

Si, C. & Xu, J. (2020). Recent Advances in Bio-medicinal and Pharmaceutical Applications of Bio-based Materials. *Current Medicinal Chemistry*. 27:4581–4583. https://doi.org/10.2174/0929867327282006212107 00.

Siswanto, S., Hilkmawati, D. & Hariyanto, M. (2019). Syhtesis of hydroxyapatite base don coral Banyuwangi using sol-gel method: observe the effect of calcination temperatura on its pase and crystallinity. *Journal of Physics: Conference Series*. 1153:012081. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012081

Siswanto, S., Hilkmawati, D., Kulsum, U., Rudyardjo, D., Apsari, R. & Aminatun, A., (2020). Biocompatibility and osteoconductivity of scaffold porous composite collagen-hydroxyapatite based coral for bone regeneration. *Journal Open Chemistry*. 18:584-590. https://doi.org/10.1515/chem-2020-0080.

Sundrarajan, M., Jegatheeswara, S., Selvam, S., Sanjeevi, N. & Balaji, M. (2015). The ionic liquid assisted green synthesis of hydroxyapatite nanoplates by Moringa oleífera flower extract: a biomimetic approach. *Materials & Design*. 88:1183-1190. http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.051.

Shi, P. Liu, M., Fan, F., Yu., Lu, W. & Du, M. (2018). Characterization of natural hydroxyapatite originated from fish bone and its biocompatibility with osteoblasts. *Materials Science & Engineering C*. 90:706-712. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.026.

Swetha, M., Sahithi, K., Moorthi, A., Srinivasan, N., Ramasamy, K. & Selvamurugan, N. (2010). Biocomposites containing natural polymers and hydroxyapatite for bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*. 47:1-4. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.03.015.

Terzioğlu, P., Öğütc, H. & Kalemtaş, A. (2018). Natural calcium phosphate from fish bones and their potential biomedical applications. Materials Science & Engineering C. 91:899-911. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.06.010.

Teymouri, A., Stuart, B. & Kumar, S. (2018). Hydroxyapatite and dittmarite precipitation from algae hydrolystate. *Algal Research*. 29:202-211. https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.11.030.

Trakoolwannachai, V., Kheolamai, P. & Ummartyotin, S. (2019). Characterization of hydroxyapatite from eggshell waste and polycaprolactone (PCL) composite for scaffold material. *Composites Part B: Engineering*. 173:106974. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106974.

Tran, H. & Bui, T. (2021). A new thermoshock-based method for rapid preparation of ultra-pure hydroxyapatite nanodebris from bovine bone. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*. 12:035014. http://dx.doi.org/10.1088/2043-6262/ac2952.

Vecchio, K., Zhang, X., Massie, J., Wang, M. & Kim, C. (2007). Conversion of bulk seashells to biocompatible hydroxyapatite for bone implants. *Acta Biomaterialia*. 3:910-918. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2007.06.003.

Viet, P., Van, N. & Si, T. (2019). Properties of hydroxyapatite prepared from different fish bones: A comparative study. *Ceramics International*. 45:20141-20147. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.280.

Walsh, P., Buchanan, F., Dring, M., Magss, C., Bell, C. & Walker, G. (2008). Low-pressure syhtesis and characterization of hydroxyapatite derived from mineralise red algae. *Chemical Engineering Journal*. 137:173-179. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.10.016.

Wu, S., Hsu, H., Hsu, S., Tseng, C. & Ho, W. (2017). Preparation and characterization of hydroxyapatite synthesized from oyster shell powders. *Advanced Powder Technology*. 28:1154-1158. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.02.001.

Xiaoying, L., Yongbin, F., Dachun, G. & Wei, C. (2007). Preparation and characterization of natural hydroxyapatite from animal hard tissues. *Trans Tech Publications*, Ltd. 342-343:213-216. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.342-343.213.

Xu, Y., Wang, D., Yang, L. & Tang, H. (2001). Hydrothermal conversión of coral into hydroxyapatite. *Materials Characterization*. 47:83-87. https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00154-1.

Zhu, X., Kim, B., Wang, Q. & Wu, Q. (2013). Recent Advances in the Sound Insulation Properties of Bio-based Materials. *BioResources*. 9:1764–1786. https://doi.org/10.15376/biores.9.1.1764-1786.

Zhu, Q., Ablikim, Z., Chen, T., Cai, Q., Xia, J., Jiang, D. & Wang, S. (2017). The preparation and characterization of HA/β-TCPM biphasic ceramics from fish bones. *Ceramics International*. 43:12213-12220. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.06.082.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 31 de enero de 2023
ISSN: 2683-1848

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Influencia de los parámetros de depósito de películas delgadas semiconductoras de óxido de cobre por SILAR

Influence of deposition parameters on copper oxide semiconductor thin films by SILAR

.

Alondra Lizeth Tobías-López [1], Víctor Hugo Martínez-Landeros[1], Luis Alfonso García-Cerda[2], Sergio García-Villarreal[1].

[1] Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia, Carr. 57, km. 5, C.P. 25710, Monclova, Coahuila, México.

[2] Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Hermosillo #140, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

Autor para correspondencia:

Alondra Lizeth Tobías López

Universidad Autónoma de Coahuila

Correo electrónico: alondratobias@uadec.edu.mx

https://orcid.org/0000-0002-9520-4561

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

En la actualidad ha aumentado el estudio de películas delgadas de óxidos metálicos debido a una gama de aplicaciones como sensores, detectores ópticos y fotovoltaicos. Los métodos de solución para el depósito de películas delgadas se caracterizan por configuraciones simples y económicas a baja temperatura. El óxido de cobre (CuO) es un material semiconductor *tipo p* con un espaciamiento de banda prohibida de 1.2-2.1 eV, alta estabilidad química y buena conductividad eléctrica. El objetivo es estudiar los efectos de los parámetros de depósito de películas delgadas de CuO por el método SILAR como material semiconductor para uso potencial en dispositivos de microelectrónica. Las películas delgadas de CuO se depositaron en sustratos de vidrio por el método químico de **A**dsorción y **R**eacción de **C**apas **I**ónicas **S**ucesivas (SILAR). Se obtuvieron por dos rutas diferentes, en ambas rutas se realizaron cien ciclos SILAR, para la ruta de tres pasos se utilizó una solución catiónica de cloruro de cobre complejado con hidróxido de amonio hasta un pH de 10, solución aniónica de agua desionizada a 90°C y enjuague en agua desionizada, y la ruta de cuatro pasos utilizó una solución precursora de cloruro de cobre 0.1M complejado con hidróxido de amonio, solución aniónica de agua desionizada a 90°C, un secado en aire y un enjuague en agua desionizada. Finalmente, las películas delgadas se sinterizaron a 300°C por tres horas. La caracterización de las películas delgadas confirmó una estructura monoclínica y tamaños de cristalita de 18 nm por difracción de rayos X, reducida transmitancia óptica y ancho de banda prohibida de 1.57 eV por espectroscopia ultravioleta-visible, densificación de la película sobre la superficie del sustrato por microscopía electrónica de barrido, análisis de las resistencias eléctricas de hoja por medición de dos puntas en corriente voltaje.

Palabras clave: películas delgadas, óxidos metálicos, material semiconductor, adsorción y reacción de capas iónicas sucesivas.

Abstract

At present, the study of thin films of metal oxides has increased due to a range of applications such as sensors, optical and photovoltaic detectors. Solution methods for thin film deposition

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

are characterized by simple and inexpensive low-temperature setups. Copper oxide (CuO) is a p-type semiconductor material, with a bandgap spacing of 1.2-2.1 eV, high chemical stability, and good electrical conductivity. The objective is to study the effects of the parameters of the use of CuO thin films by the SILAR method on the properties of the material for potential in microelectronic devices. CuO thin films were deposited on glass substrates by the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) chemical method. They were obtained by two different routes, in which 100 SILAR cycles were performed. , for the 3-step route, a cationic solution of copper chloride complexed with ammonium hydroxide was used up to a pH of 10, an anionic solution of deionized water at 90°C and rinsing in deionized water, and the 4-step route used a 0.1M copper chloride precursor solution complexed with ammonium hydroxide, anionic deionized water solution at 90°C, air drying, and deionized water rinse. Finally, the thin films were sintered at 300°C for 3 hours. The characterization of the thin films confirmed a monoclinic structure and grain sizes of 18 nm by X-ray diffraction, reduced optical transmittance and a forbidden band width of 1.57 eV by ultraviolet-visible spectroscopy, densification of the film on the substrate surface by scanning electron microscopy, analysis of the sheet electrical resistance by measurement of two current-voltage probes.

Keywords: thin films, metal oxides, semiconductor material, successive ionic layer adsorption and reaction.

1. Introducción

Gran parte del desarrollo energético está centrado en el uso de óxidos metálicos semiconductores para la fabricación de dispositivos de microelectrónica. En los últimos años ha aumentado el estudio de las películas delgadas de óxido de cobre (CuO) debido a sus atractivas características estructurales, ópticas, morfológicas y eléctricas como material semiconductor en diferentes dispositivos.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Las películas delgadas son capas de materiales finos con espesores de unos cuantos nanómetros hasta cientos de micrómetros, las cuales son creadas por condensación una a una de materia, como átomos o moléculas (Nieto y col., 1994). La película delgada de óxido de cobre es un material semiconductor *tipo p* con un ancho de banda prohibida directa de 1.2 a 2.1 eV y estructura cristalina monoclínica, la cual ha sido de especial interés como material semiconductor en las últimas décadas debido a su selectividad para algunos gases a baja temperatura, alta conductividad eléctrica, buena estabilidad química y nula toxicidad.

Las aplicaciones electrónicas han crecido mediante técnicas de fase de solución durante muchos años. El método de crecimiento de solución más antiguo es el depósito por baño químico (CBD), donde la película se hace crecer en un recipiente de reacción con todos los precursores necesarios para el depósito. El método de adsorción y reacción de capas iónicas sucesivas (SILAR) puede considerarse una versión modificada del CBD para control de la síntesis química (Nieto y col., 1994; Hernán y Calle, 2015).

El método químico SILAR es uno de los más innovadores en las últimas décadas, este se ha empleado para depositar gran variedad de materiales compuestos en forma de película delgada. Una de las principales ventajas es que la técnica es económica, simple y conveniente para depositar en grandes superficies, se puede utilizar cualquier tipo de sustrato, el espesor de la película y el tiempo de depósito puede ser controlado al variar parámetros, además se obtienen películas de alta calidad realizando el depósito a temperatura ambiente y presión atmosférica, y no se requieren altos niveles de vacío.

Este tipo de películas delgadas de **óxido de cobre** se han empleado en áreas de aplicación potencial como sensores de gas (Khot y col., 2020), transistores (Nguyen y Trinh, 2020) y celdas solares (Sayem Rahman y col., 2015; Gençyılmaz y Taşköprü, 2017).

Se han reportado resultados muy favorecedores con diferentes métodos de depósito y aplicaciones.

Rydosz (2018) reportó que los sensores de gas de película delgada **CuO** exhibieron altos parámetros de sensibilidad, selectividad y estabilidad. Además, se demostró la

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

posibilidad de funcionar a temperatura ambiente con estabilidad a largo plazo, lo que hace que este material sea muy atractivo en aplicaciones de detección de gases.

Maeng y col. (2016) depositaron películas delgadas de **CuO** por el método de depósito de capas atómicas utilizando una temperatura de 100°C, y fabricaron transistores de película delgada con alto desempeño eléctrico mostrando una movilidad de efecto de campo de 5.6 cm^2/v-s después de un sinterizado aplicado.

Daoudi y col. (2019) depositaron películas delgadas de **óxido de cobre** por el método SILAR para aplicación en celdas solares, como resultado obtuvieron una película delgada con estructura cristalina monoclínica, compacta y buena cristalinidad.

Singh y col. (2019) depositaron películas delgadas de óxido de cobre por el método sol-gel para aplicación en diodos de heterounión **n-CuO/p-Si**, donde los parámetros eléctricos obtenidos experimentalmente fueron validados con los datos de un dispositivo simulador.

El objetivo es estudiar el efecto de los parámetros de depósito de películas delgadas de **CuO** por el método SILAR como material semiconductor para uso potencial en dispositivos de microelectrónica.

2. Materiales y Métodos

La experimentación se llevó a cabo utilizando los siguientes reactivos de grado analítico: cloruro de cobre (SIGMA-ALDRICH 97%) (precursor catiónico), agua desionizada a 90°C (precursor aniónico) e hidróxido de amonio (agente complejante) (SIGMA-ALDRICH). Las películas delgadas fueron depositadas en sustratos de vidrio.

Estos sustratos de vidrio fueron limpiados en un baño ultrasónico Branson 2800. Posteriormente se lavaron durante diez minutos con acetona, alcohol isopropílico y agua desionizada, por separado, antes de los depósitos.

Para el depósito de las películas delgadas de CuO, como precursor catiónico un complejo de cobre-amonio ($Cu(NH_3)_4^{2+}$) fue preparado utilizando 30 ml de solución 0.1M de $CuCl_2$-$2H_2O$, y se añadió hidróxido de amonio (28%) gota a gota bajo agitación constante

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

hasta obtener un pH-10. Como precursor aniónico se utilizó 30 ml de agua desionizada a una temperatura de 90ºC.

Se realizaron dos rutas diferentes del método SILAR para la síntesis de películas delgadas.

La primera ruta constó de tres pasos (Figura 1):

1. El sustrato fue inmerso en la solución catiónica ($Cu(NH_3)_4^{2+}$) a temperatura ambiente por 20 segundos, de modo que los iones Cu^{+2} se adsorban sobre la superficie del sustrato.
2. El sustrato fue inmerso en agua caliente a 90ºC por 10 segundos, promoviendo la formación de una capa de CuO.
3. El sustrato fue inmerso en agua desionizada a temperatura ambiente por 10 segundos para remover partículas débilmente unidas.

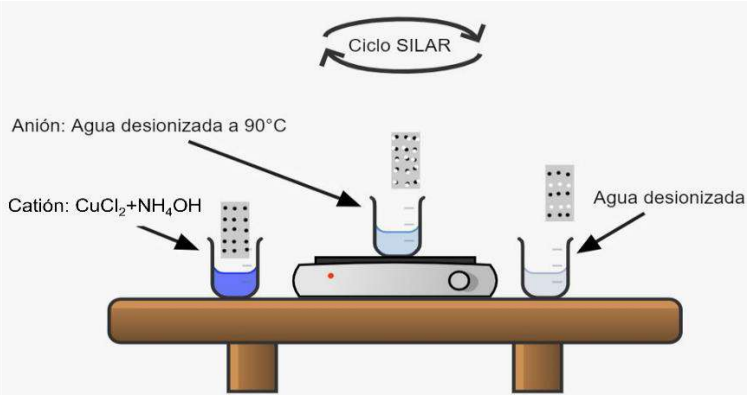


Figura 1. Representación del método SILAR de 3 pasos.

Fuente: Elaboración propia.

La segunda ruta constó de cuatro pasos (Figura 2):

1. El sustrato fue inmerso en la solución catiónica ($Cu(NH_3)_4^{2+}$) a temperatura ambiente por 20 segundos creando una pequeña película líquida sobre el sustrato.
2. El sustrato fue inmerso en agua caliente a 90ºC por 10 segundos promoviendo la formación de una capa de CuO.
3. El sustrato fue secado en aire por 20 segundos.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

4. El sustrato fue inmerso en agua desionizada a temperatura ambiente por 20 segundos para remover partículas débilmente adsorbidas.

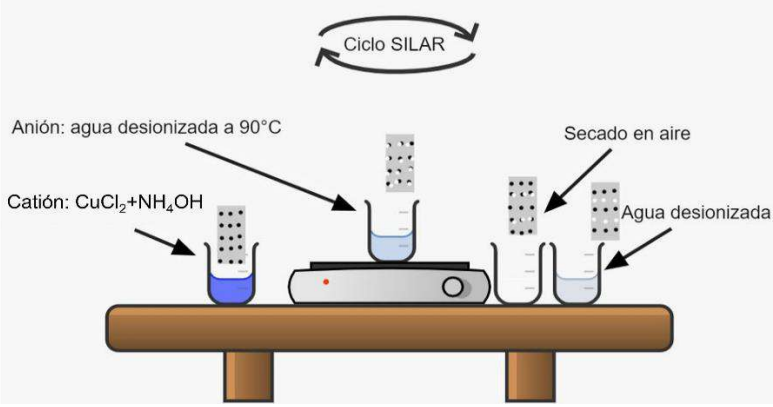


Figura 2. Representación del método SILAR de 4 pasos.

Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar los ciclos de depósito por ambas rutas, las películas delgadas se secaron por 10 minutos a 100°C, posteriormente se sometieron a un tratamiento térmico a 300°C por tres horas. Para conocer las propiedades de las películas delgadas de CuO obtenidas fueron caracterizadas por diferentes técnicas. Se realizó difracción de rayos X para las propiedades estructurales, utilizando un equipo Rigaku última IV, a una velocidad de 5 grados por minuto en un rango de 10 a 80°, se utilizó la ecuación de Scherrer para determinar el tamaño de cristalita. Para las propiedades ópticas se realizó espectroscopia ultravioleta visible en un equipo cintra 2020 con límite superior: 1000, límite inferior: 290, velocidad: 240, paso: 0.898 y ancho de corte: 1.0, además se utilizó la relación de Tauc para determinar la energía del ancho de banda prohibida. Para las propiedades superficiales se realizó microscopia electrónica de barrido en un equipo JEOL modelo JCM 6000, en alto vacío, con una potencia de medición de 15 kV y magnificaciones del orden de 3,000x. Además, para las propiedades eléctricas se realizaron pruebas de resistencia eléctrica en un multímetro marca Neng, realizando mediciones en 5 puntos de la película delgada (2 en puntos inferiores, 1 al centro y 2 en puntos superiores).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

3. Resultados y discusión

3.1 Propiedades estructurales

Las propiedades estructurales de las películas delgadas de CuO fueron analizadas por difracción de rayos X, los patrones de difracción obtenidos fueron comparados con la carta de referencia #48-1548 correspondiente al óxido de cobre. Se calculó el tamaño de cristalita en las películas delgadas de CuO a partir del pico (002) usando la fórmula de Scherrer (Ecuación 1).

$$\boldsymbol{D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}} \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Donde **D** es el tamaño de cristalita, $\boldsymbol{\lambda}$ es la longitud de onda de la radiación incidente, **k** = 0.90 es el factor de forma, $\boldsymbol{\theta}$ es el ángulo de Bragg, y $\boldsymbol{\beta}$ es el ancho completo a la mitad del máximo obtenido de un ajuste de Gauss al pico de difracción (FWHM).

En la Figura 3 se pueden observar los patrones de difracción de las películas de óxido de cobre sintetizadas por ambas rutas y con sinterizado de 300ºC por 3 horas, en los cuales se observan los picos más intensos en los ángulos 35.47° y 38.52° de posición 2θ, correspondientes a los planos (002) y (111), los cuales indicaron una fase monoclínica. Los picos de menor intensidad identificados en (110), (200), (20-2), (020), (202), (11-3), (022), (220) ubicados en los ángulos 32.50°, 38.90°, 48.71°, 53.48°, 58.26°, 61.52°, 68.12°, 74.97° respectivamente, confirmaron óxido de cobre (CuO) policristalino (Daoudi y col., 2019). Asimismo, se obtuvieron tamaños de cristalita en el orden de 18 nm para ambas rutas.

De acuerdo con los patrones de difracción de la Figura 3 se observa la presencia del material de óxido de cobre en las películas delgadas depositadas por ambas rutas, sin embargo, para el caso de la ruta 4, donde se adicionó el paso de secado en aire, se obtuvieron estrictamente los mismos picos, pero con una cristalinidad más intensa. En general, se verifica que el recocido aumenta la cristalinidad, la cobertura superficial y la conectividad de grano de las películas delgadas de CuO (Sadale y col., 2022). Así como lo relacionado a mejoradas características estructurales a mayor temperatura y tiempo de tratamiento térmico de acuerdo con (Shinde y col., 2019).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

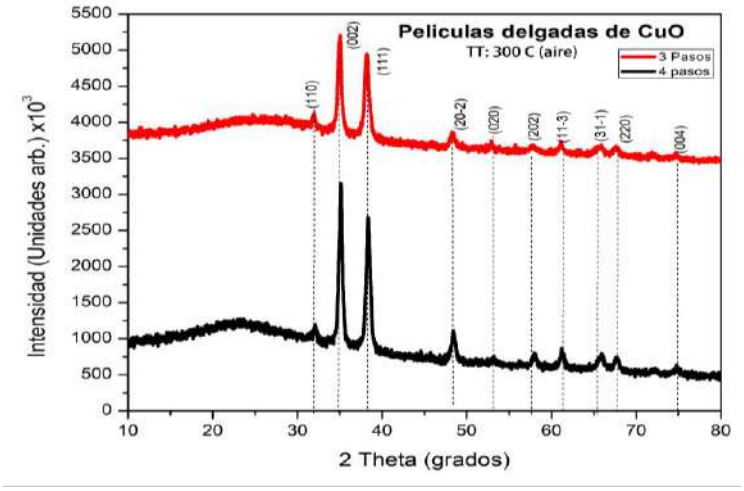


Figura 3. Patrones de difracción de películas de CuO por el método SILAR: 3 y 4 pasos.**Fuente:** Elaboración propia.

Coincide con lo reportado por Tamayo y col. (2022), quienes comprobaron que con mayor tiempo de tratamiento térmico se promueve la orientación preferencial en dichas reflexiones, dando lugar a la formación del óxido de cobre. Choudhary y col. (2018) estableció que el mecanismo de oxidación para la formación del óxido de cobre inicia a una temperatura de 300°C.

De esta forma, mediante la síntesis química del depósito SILAR utilizando las rutas de tres y cuatro pasos se consiguió la orientación preferencial indicada para el óxido de cobre a las condiciones de tiempo y temperatura aplicadas. Además, se confirma que modificar la ruta de depósito al agregar un paso de secado en aire, promueve una adherencia de mayor cantidad de material o densificación de la película delgada sobre la superficie del sustrato de vidrio, lo cual se verifica en las imágenes de microscopía.

3.2 Propiedades ópticas

El análisis de las propiedades ópticas de las películas delgadas de CuO se realizó con un espectrofotómetro de ultravioleta visible (UV-Vis), donde se midió la transmitancia y con esta se calculó el valor del ancho de banda prohibida. La transmitancia obtenida fue muy baja

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

<0.02% en el espectro visible, lo cual reveló que las películas delgadas son gruesas y opacas. La energía del ancho de banda prohibida se calculó a partir de un ajuste lineal, mostrado en la Figura 4, por medio de la relación de Tauc, donde hv (eV) es la energía del fotón y OD es la densidad óptica.

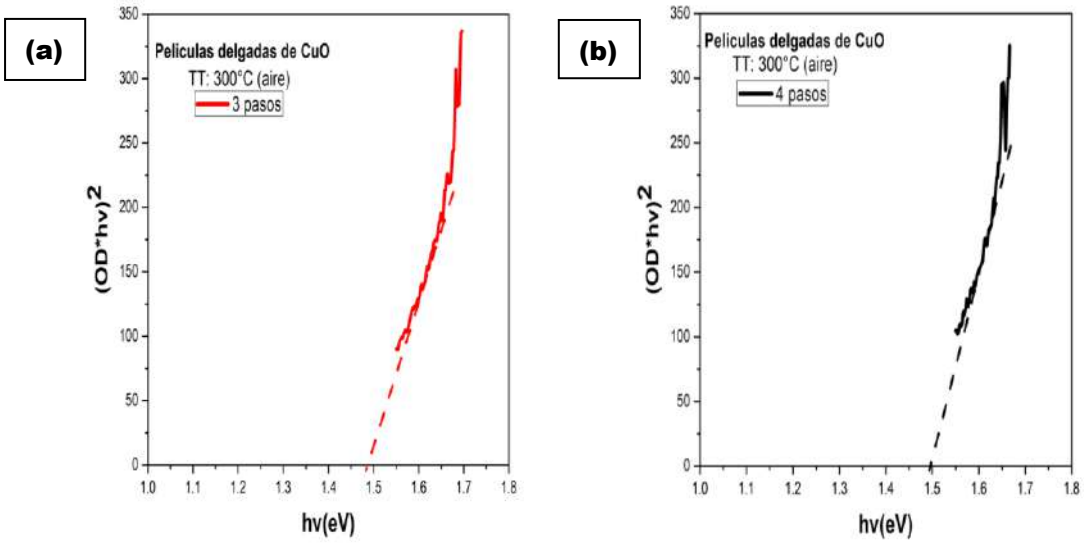


Figura 4. Ajuste lineal para la energía del ancho de banda prohibida de las películas delgadas de CuO (a) 4 pasos, (b) 3 pasos.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de ancho de banda prohibida en ambos experimentos con y sin paso de secado en aire fueron del orden de 1.46-1.58 eV, los cuales están dentro del rango reportado por (Saadaldin y col., 2015), así como para el óxido de cobre monofásico alrededor de 1.5 eV (Li y col., 2016).

3.3 Propiedades morfológicas

Las propiedades **morfológicas** de la superficie de las películas delgadas de óxido de cobre fueron analizadas por microscopía electrónica de barrido. En esta sección se muestran las

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

imágenes de la **morfología** superficial obtenidas a una magnificación de 3,000x de las muestras de tres y cuatro pasos tratados térmicamente a 300ºC por tres horas.

En la imagen superficial de la película por la ruta de tres pasos (Figura 5a) se observó que la película delgada mostró un mayor contraste entre diferentes tamaños de partículas, de mayor aumento y aglomeradas en ciertas zonas. También se observaron ciertos agrietamientos en la superficie de la película delgada sobre el sustrato, identificando que el tipo de ruta de depósito contribuye en una erosión del material crecido de acuerdo con los parámetros de SILAR, como es reportado al ajustar tiempo y temperatura de tratamientos térmicos (Yuliarto, 2016). A partir de la imagen superficial de la película por la ruta de cuatro pasos (Figura 5b), se observaron partículas y límites de grano no uniformes, pero sí distribuidas sobre toda la superficie del sustrato de vidrio; la película delgada mostró visiblemente una mayor densificación del material consiguiendo partículas más grandes y distribuidas por todo el sustrato, y sin desprendimiento. Este proceso de aumento o denominado coalescencia es producto de la nucleación inicial en la superficie y aumenta por la influencia de los parámetros aplicados, similar al tiempo y temperatura de tratamiento térmico reportado por (Lee y Wang, 2021; Sultana y col., 2018).

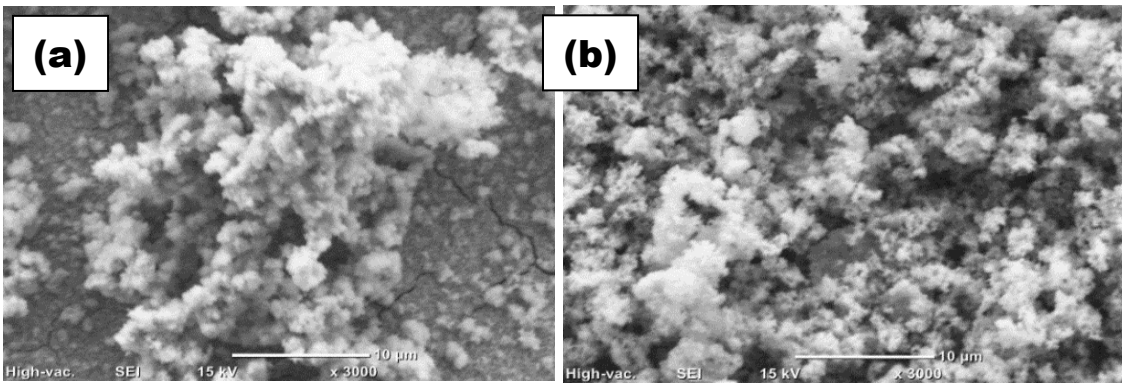


Figura 5. Imágenes de microscopia electrónica de barrido de las películas delgadas de CuO: (a) 3 pasos, (b) 4 pasos

Fuente: Elaboración propia.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

3.4 Resistencia eléctrica

Las características eléctricas fueron realizadas a partir de un conjunto de mediciones de resistencia eléctrica de hoja sobre las películas delgadas de CuO de ambas rutas de depósito, las cuales se muestran en la Figura 6, donde se puede observar que la resistencia eléctrica de la película delgada para ambas rutas mantiene una tendencia lineal en las diferentes regiones de medición. Además, se observa que la película delgada de la ruta de cuatro pasos presenta menor resistencia eléctrica de hoja, esto debido a lo observado y analizado en cuanto a la influencia del paso de secado en aire, demostrando que, la intensidad cristalina del material aumentó, el orden de la energía de ancho de banda prohibida se mantuvo, la adherencia y densificación del material de la película delgada se incrementó sobre la superficie del sustrato de vidrio, por ello, esta película delgada es un potencial candidato como material semiconductor en la integración de diferentes dispositivos microelectrónicos, entre ellos, sensores de gas, diodos, transistores o celdas solares.

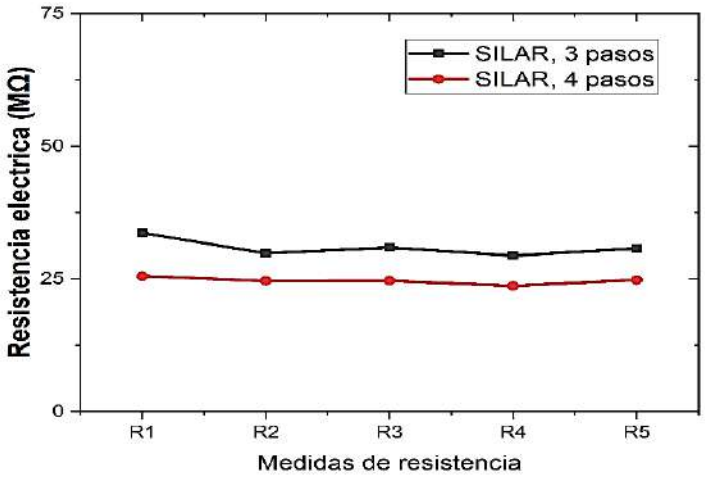


Figura 6. Resistencia eléctrica de hoja en las películas delgadas de CuO: 3 y 4 pasos

Fuente: Elaboración propia

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Conclusiones

Se aplicó un tratamiento térmico en atmósfera de aire para remover humedad en las películas delgadas obtenidas por el método SILAR, a su vez permitiendo mejorar las características estructurales, ópticas, morfológicas y eléctricas del material semiconductor de CuO.

Los patrones de difracción confirmaron la formación del material de CuO con fase monoclínica, y por ambas rutas se identificaron los planos característicos, sin embargo, se obtuvo mayor cristalinidad en la película obtenida por la ruta de **cuatro pasos,** debido al **paso** agregado de secado en aire, además se obtuvieron tamaños de cristalita en un orden de 18 nm para ambas rutas.

La transmitancia óptica por ultravioleta-visible de las películas delgadas de CuO en ambas rutas fue reportada menor a 0.02%, además se realizó un ajuste lineal para la determinación de la energía del ancho de banda prohibida, y se reportó alrededor de 1.5 eV para ambas rutas.

Con las imágenes de morfología superficial se permitió identificar que la película delgada obtenida por la ruta de tres pasos presentó mayor contraste en los tamaños de aglomerados, así como agrietamientos de la película; por otro lado, la película delgada obtenida por la ruta de cuatro pasos presentó una superficie más uniforme con granos bien distribuidos y adheridos entre ellos.

Por último, se confirmó que la película delgada obtenida por la ruta de cuatro pasos presentó menor resistencia eléctrica de hoja, esta condición presentó una estructura más cristalina, y mayor densificación de material, debido al paso adicional de secado en aire en el método SILAR, logrando un contendiente material semiconductor para diversas aplicaciones de microelectrónica.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo concedido para realizar mis estudios de Maestría en Ciencia de los Materiales. CVU: 1100410

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

A CIQA, por el apoyo con los equipos necesarios para caracterización y conclusión del proyecto de investigación.

Referencias

Choudhary, S., Sarma, J. V. N., Pande, S., Ababou-Girard, S., Turban, P., Lepine, B. & Gangopadhyay, S. (2018). Oxidation mechanism of thin Cu films: A gateway towards the formation of single oxide phase. *AIP Advances*, *8*(5): 1-16. https://doi.org/10.1063/1.5028407

Daoudi, O., Qachaou, Y., Raidou, A., Nouneh, K., Lharch, M. & Fahoume, M. (2019). Study of the physical properties of CuO thin films grown by modified SILAR method for solar cells applications. *Superlattices and Microstructures*, *127*: 93–99. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.03.006

Gençyılmaz, O. & Taşköprü, T. (2017). Effect of pH on the synthesis of CuO films by SILAR method. *Journal of Alloys and Compounds*, *695*: 1205–1212. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.247

Hernán, A. & Calle, B. (2015). *Fabricación y caracterización de películas delgadas de óxidos transparentes con aplicaciones ópticas*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León]

Repositorio académico digital de la universidad Autónoma de Nuevo León

http://eprints.uanl.mx/10992/

Khot, S., Phalake, S., Mahadik, S., Baragale, M., Jagadale, S., Burungale, V., Navale, Y., Patil, V., Patil, V., Patil, P., Patil, S. & Patil, S. (2020). Synthesis of cuo thin film sensors by spray pyrolysis method for no2 gas detection. *Materials Today: Proceedings*, *43*(2): 2694–2697. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.583

Lee, W. J. & Wang, X. J. (2021). Structural, optical, and electrical properties of copper oxide films grown by the silar method with post-annealing. *Coatings*, *11*(7): 1-13 https://doi.org/10.3390/coatings11070864

Li, Z., Tong, K., Shi, R., Shen, Y. & Zhang, Y. (2016). Reactive plasma deposition of high quality single phase CuO thin films suitable for metal oxide solar cells. *Journal of Alloys and*

Compounds. 695, 3116-3123. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.338

Maeng, W., Lee, S. H., Kwon, J. D., Park, J. & Park, J. S. (2016). Atomic layer deposited p-type copper oxide thin films and the associated thin film transistor properties. *Ceramics International*, *42*(4): 5517–5522. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.12.109

Nguyen, B. & Trinh, Q. (2020). Solution-Processed Cupric Oxide P-type Channel Thin-Film Transistors. *Thin Solid Films*, *704*: 137991. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137991

Nieto, E., Fernandez, F. & Moure, P. D. C. (1994). Cerámica y Vidrio Películas delgadas : fabricación y aplicaciones. *Boletín de La Sociedad de Ceramica y Vidrio*, *33*(5): 245–258.

Rydosz, A. (2018). The use of copper oxide thin films in gas-sensing applications. *Coatings*, *8*(12): 425. https://doi.org/10.3390/coatings8120425

Saadaldin, N., Alsloum, M. N. & Hussain, N. (2015). Preparing of Copper Oxides Thin Films by Chemical Bath Deposition (CBD) for Using in Environmental Application. *Energy Procedia*, *74*: 1459–1465. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.794

Sadale, S. B., Patil, S. B., Teli, A. M., Masegi, H. & Noda, K. (2022). Effect of deposition potential and annealing on performance of electrodeposited copper oxide thin films for supercapacitor application. *Solid State Sciences*, *123*: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2021.106780

Sayem Rahman, A. S. M., Islam, M. A. & Shorowordi, K. M. (2015). Electrodeposition and characterization of copper oxide thin films for solar cell applications. *Procedia Engineering*, *105*(Icte 2014): 679–685. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.048

Shinde, S. K., Mohite, S. M., Kadam, A. A., Yadav, H. M., Ghodake, G. S., Rajpure, K. Y., Lee, D. S. & Kim, D. Y. (2019). Effect of deposition parameters on spray pyrolysis synthesized CuO nanoparticle thin films for higher supercapacitor performance. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *850*: 113433. https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113433

Singh, R., Yadav, L., Shrey & Shweta, T. (2019). Effect of annealing time on the structural and optical properties of n-CuO thin films deposited by sol-gel spin coating technique and its application in n-CuO/p-Si heterojunction diode. *Thin Solid Films*, *685*: 195–203. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.06.026

Sultana, J., Paul, S., Karmakar, A., Dalapati, G. K. & Chattopadhyay, S. (2018). Optimizing

the thermal annealing temperature: technological route for tuning the photo-detecting property of p-CuO thin films grown by chemical bath deposition method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *29*(15): 12878–12887. https://doi.org/10.1007/s10854-018-9407-3

Tamayo, K., Marín, L., Gross, K., Amaya, C., Valle, U., Películas, G. De, & Gpd, D. (2022). Influence of thermal annealing on the structural and optical properties of nanostructures based on copper oxides Influencia del tratamiento térmico en las propiedades estructurales y ópticas de nanoestructuras basadas en óxidos de cobre. *Ingeniería y Competitividad. Revista Científica y Tecnológica*, *24*(1): 1–16. DOI: 10.25100/iyc.24i1.11349

Yuliarto, B. (2016). Preparation of Copper Oxide Nanostructure Thin Film For Carbon Monoxide Gas Sensor. *Molekul*, *11*(2): 202. https://doi.org/10.20884/1.jm.2016.11.2.230

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Nanotubos de carbono en aplicaciones médicas

Carbon nanotubes in medical applications

L.A. Cortés-Castrejón[1], Y. K. Reyes-Acosta[1], Gustavo Soria-Arguello[2], Felipe de Jesús Elizalde Herrera[1], A. Sáenz-Galindo[1], Rosa Idalia Narro-Céspedes*[1]

[1]Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila,
Blvd. Venustiano Carranza 935, República, 25280 Saltillo, Coah.;
[2] Centro de Investigación en Química Aplicada,
Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, 25294 Saltillo, Coah.

rinarro@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

RESUMEN

A lo largo del tiempo la necesidad de evolución para el ser humano ha sido de vital importancia, una de las áreas que más ha evolucionado ha sido la medicina. En los últimos años ha tenido un mayor auge gracias a los nanotubos de carbono (CNT), con los cuales se han logrado realizar investigaciones extensas, llegando a obtener resultados prometedores. La presente revisión bibliográfica sustenta como los nanotubos de carbono han mejorado las propiedades de los componentes utilizados en aportaciones médicas y como hay un progreso en sus aplicaciones. Las áreas que más investigaciones y aplicaciones han sido desarrolladas es en la liberación de fármacos, tratamientos contra el cáncer e ingeniería de tejidos.

Es decir que gracias a las propiedades químicas y físicas que presentan estas nanoestructuras se ha logrado un avance significativo, sin embargo, los NTC son nanomateriales que pueden llegar a ser tóxicos debido a su tamaño, pero también se ha encontrado que los MWCNT por sus siglas en inglés multi walled carbon nanotubes. pueden degradarse, lo cual abre las posibilidades de que los nanomateriales puedan biodegradarse. La investigación de estas nanoestructuras de carbono sigue siendo de gran interés en nuevos campos en la medicina.

PALABRAS CLAVES: Nanotubos de Carbono (CNT), medicina, estudios.

ABSTRACT

Throughout time, the need for evolution for human beings has been of vital importance, and one of the areas that has evolved the most has been medicine. In recent years it has had a greater boom thanks to carbon nanotubes (CNT), with which extensive research has been

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

carried out, obtaining promising results. This literature review supports how carbon nanotubes have improved the properties of components used in medical devices and how there is progress in their applications. The areas where most research and applications have been developed are in drug delivery, cancer treatments and tissue engineering.

That is to say that thanks to the chemical and physical properties that these nanostructures present, significant progress has been achieved, however, NTCs are nanomaterials that can become toxic due to their size, but it has also been found that MWCNTs can degrade, which opens the possibilities that nanomaterials can biodegrade. Research into these carbon nanostructures continues to be of great interest in new fields in medicine.

KEYS WORKS: Carbon Nanotubes (CNTs), medicine, studies.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han explorado los derivados del carbono, siendo uno de ellos los nanotubos de carbono (CNT), los cuales se clasifican en nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) por sus siglas en inglés single walled carbon nanotubes y nanotubos de pared múltiple (MWCNT) por sus siglas en inglés multi walled carbon nanotubes. Las propiedades que los caracterizan es su alta elasticidad y conductividad térmica, son de baja densidad, tienden a ser inertes químicamente, también poseen un peso ultraligero, tienen una alta resistencia a la tracción y poseen una estructura electrónica, lo que los hace un material calificado para el uso en diversas aplicaciones (Anzar y col., 2020).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Los CNT son considerados un material prometedor en el ámbito médico, esto se debe a que estos tienen tamaño nanométrico, pudiendo hacer una interacción directa con moléculas concretas, presentan propiedades antibacterianas, antifúngicas, peso ultraligero, y pueden ser utilizados como portadores de proteínas, entre otras. Los CNT también son de suma importancia en la fabricación de sensores que sirven para detectar distintas bacterias patógenas y ayudan en el tratamiento del cáncer (Anzar y col., 2020).

La finalidad del presente artículo es dar un panorama general sobre las aplicaciones médicas que se han logrado con los nanotubos de carbono, hasta el momento.

Antecedentes

Nanotubos de carbono (CNT)

Los CNT son alótropos de carbono, los cuales tienen una semejanza a un cable cuántico unidimensional, su estructura es característica por ser tubular la cual está hecha por láminas de grafeno, enrolladas entre sí, su radio es de 3 a 30 nm y su longitud se puede medir en micrómetros, sus paredes se componen de una red hexagonal. El comienzo del estudio y síntesis de los CNT fue entre los años 50´s y 80´s, sin embargo, fue hasta 1991 que fueron reconocidos cuando Ijima describió su estructura (Singh y col., 2017). Este material hecho de carbono tiene como característica principal su forma tubular, estructura hexagonal, y diámetro en escala nanométrica. A partir de su síntesis, se pueden obtener nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) sus siglas en inglés multi walled carbon nanotubes., estos se realizan a través de varias metodologías siendo las más comunes: arco de descarga,

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

ablación laser y disposición química de vapor. Los SWCNT poseen una única capa de grafeno, tiene un diámetro que va de 0.4 a 2 nm, y se requieren diversas condiciones como es el control de crecimiento, debido a esto la síntesis de CNT en grandes cantidades es difícil de obtener. Por el método de deposición química de vapor, se proporciona suficiente energía para la descomposición de los hidrocarburos, sin embargo, se obtiene del 30-50 % rendimiento, y contiene una pureza pobre (Portillo y col., 2017). Por el método de arco de descarga se utilizan electrodos de carbono como fuente y una descarga eléctrica de aproximadamente de 50-100 A, pueden presentar rendimientos del 80 %, sin embargo, la dispersión de este nanomaterial es difícil, debido a su fácil aglomeración y tiende a tener más defectos en su estructura (Caballero Silva, 2020). Los MWCNT están compuestos por 2 o más tubos concéntricos de capas de grafito que contienen 0.34 nm de separación entre cada una, pueden tener hasta 100 nm de diámetro. En los MWCNT existen dos tipos de estructuras, como lo es en espiral (Swiss-roll), la cual tiene como característica que los nanotubos están compuestos por rollos de hojas de grafeno en forma de espiral, y la segunda estructura llamada *Russian doll* está compuesta por cilindros huecos concéntricos de carbono, esta estructura es la que se presenta con mayor periodicidad. (González Velázquez, 2015) (Singh y col., 2017).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

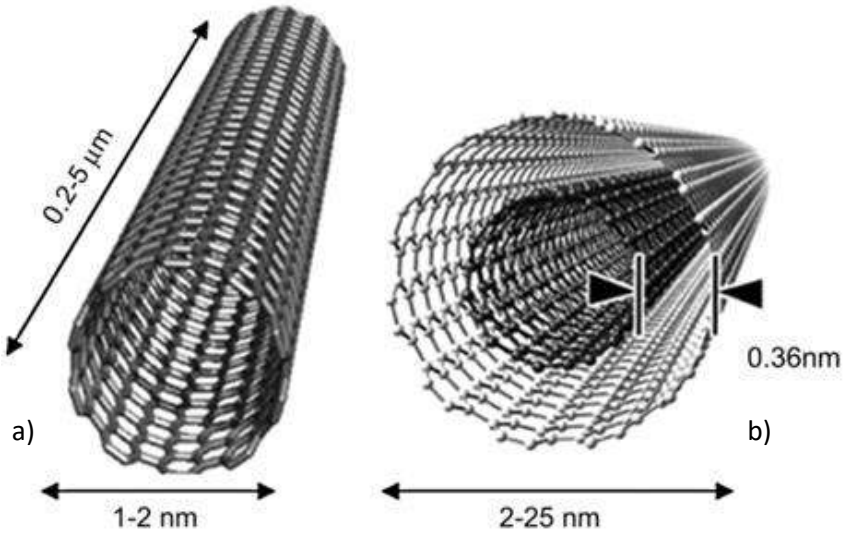


Figura 1. Nanotubos de carbono a) SWCNT y b) MWCNT (Castaños, 2015)

Nanomedicina

La nanomedicina es la aplicación de la nanotecnología en la medicina clínica, se refiere principalmente a las mejoras que se obtienen en los diagnósticos, en la liberación de fármacos y en tratamientos de diferentes enfermedades, como lo es el cáncer, enfermedades cardiovasculares, utilizados como antisépticos médicos (Blanco Bea y col., 2011). En la Figura 2 se presentan los tipos de nanomateriales más comunes utilizadas en la medicina, así como las áreas dentro de la medicina en que se aplican.

La nanotecnología pretende abarcar 3 áreas primordiales para fines médicos.

El primero: es la liberación de fármacos e ingeniería de tejidos. Lo que se pretende en esta área es la creación de biomateriales nanoestructurados que logren tener un sistema que transporte los fármacos de una manera controlada, como una micela, ayudando a proteger el fármaco de la degradación y al mismo tiempo le permite desplazarse hacia donde se requiere

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

en el cuerpo, otra opción es la parte de la biología celular, utilizada en la medicina regenerativa logrando el remplazo o la reparación de tejidos u órganos dañados.

El segundo: es el diagnóstico, el cual pretende la creación de un nanodispositivo que logre identificar una enfermedad a un nivel celular, esto se logra a través de nano-biosensores o nanosistemas de imagen, con los cuales se detecta en tiempo real y con una alta sensibilidad un analito determinado.

El tercero: está enfocado en el área de terapia y diagnóstico, lo que se pretende realizar en esta área, es obtener un diseño que logre identificar una patología y haya una liberación de moléculas terapéuticas simultáneamente y de manera controlada (Rojas-Aguirre y col., 2016).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

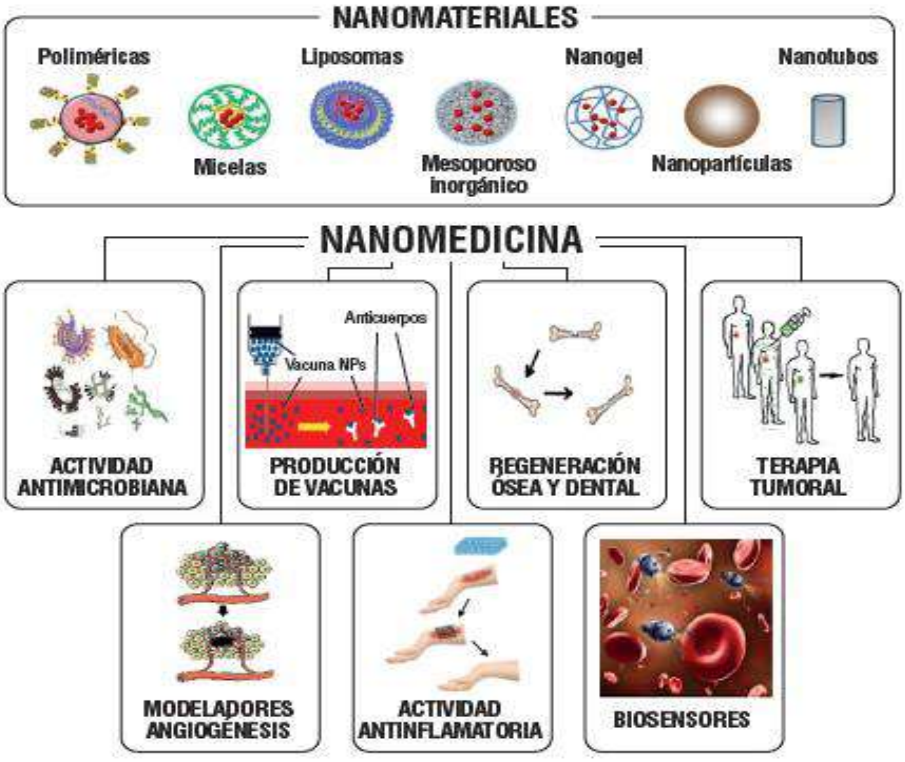


Figura 2: Nanomedicina (Garzón, 2019)

Aplicaciones Médicas

A continuación, se harán referencias a aplicaciones médicas, tales como liberación de fármacos, regeneración de tejidos, cáncer, medicina regenerativa (Blanco Bea y col., 2011).

Liberación de fármacos e ingeniería de tejidos

Los CNT han sido de gran utilidad para el transporte de fármacos gracias a su composición química, tamaño nanométrico y dispersión, aunque esta última se obtiene gracias a la funcionalización, siendo esta una modificación de propiedades por la adsorción de moléculas en las paredes exteriores de los CNT (Balandrán-Quintana y col., 2008). En el año 2021

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Priyanka Nuñez y colaboradores realizaron un estudio donde se demostró que los CNT y los liposomas que son vesículas coloidales que poseen un tamaño de 50 nm, lograron demostrar que los CNT y los liposomas juntos transportaran fármacos; y al analizar sus efectos conjuntos observaron que se pueden enfocar en aplicaciones biomédicas y en terapias contra el cáncer gracias a su elevada eficacia de penetración y retención especifica en el tumor además de su capacidad para matar las células cancerígenas. En la Figura 3 se observa una nanocápsula de carbono contra el cáncer (Tabla 1) (Núñez del Prado, 2021) (Carvalho y col., 2004).

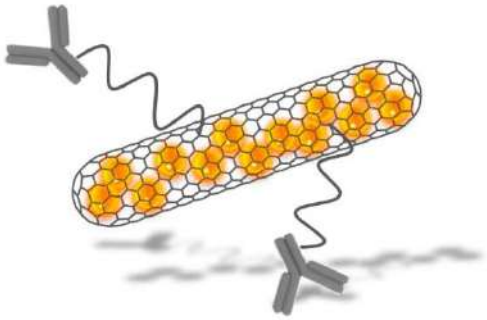


Figura 3. Nanocápsula de carbono contra el cáncer. (Spinato y col., 2016)

TABLA 1. Nanotubos de carbón con moléculas para aplicaciones medicas

TIPOS DE NANOTUBOS DE CARBONO	MOLECULAS	APLICACIÓN MEDICA	REFERENCIA
SWCNT	Moléculas de ADN, péptidos y proteínas	Cáncer	Andrade Guel y col., 2012
CNT	Biomoléculas	Regeneración de tejidos, transporte de farmacos	Jain y Tiwari, 2021
CNT	Molécula CD44	Cáncer de mamá	Jain Singhai y Ramteke, 2020
CNT	liposimas	Transporte de farmacos	Priyanka Nuñezy col., 2021

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Stefano Mezzasalma y colaboradores, realizaron un estudio en el cual hicieron una revisión de los avances que hay en el acoplamiento de redes neuronales con mallas de CNT, donde se hizo hincapié en las propiedades de los nanotubos de carbono como molécula individual, con uniones y con capas moleculares, como lo es la interacción de los CNT con la barrera hematoencefálica, la administración de fármacos y sus funcionalizaciones (Tabla 2) (Mezzasalma y col., 2021).

Tabla 2. Nanotubos de carbono con otras aplicaciones medicas

TIPOS DE NANOTUBOS DE CARBONO	OTROS	APLICACIÓN MEDICA	REFERENCIA
CNT	Sensores	Diagnóstico	Kulakova y Lisichkin, 2022
CNT	ZnO	Antisépticos médicos	Zhu y col., 2017
CNT	Biomateriales	Regeneración de tejidos	Prohias y col., 2022
SWCNT	Ácido fólico, flureseína y capecitabina	Cáncer	Gonzáles-Domínguez y col., 2022
CNT	Mallas de CNT	Administración de farmacos	Stefano Mezzasalma y col., 2021
SWCNT	Farmacéuticos	Células cancerosas	Tian y col., 2022
SWCNT	Agentes de imagen	Localización de tumores	Ali-Boucetta y Kostarelos, 2013

Otras aplicaciones que se le están dando al derivado del grafeno en especial a los CNT es en la medicina regenerativa, (Eatemadi y col., 2014), son utilizados con frecuencia como aditivos en materiales que se emplean para la creación de tejidos artificiales, prótesis e implantes. Los CNT tienden a ejercer de andamio para las células madre creando tejidos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

artificiales, gracias a su resistencia mecánica, son relativamente fácil de funcionalizar con proteínas o polímeros como lo es el chitosan que ayuda a mejorar la capacidad de adhesión en los tejidos (Tabla 3) (Pérez, 2020).

Tabla 3. Nanotubos de carbono con proteínas para aplicaciones medicas

TIPOS DE NANOTUBOS DE CARBONO	PROTEINAS	APLICACIÓN MEDICA	REFERENCIA
CNT	Proteínas y chitosan	Medicina regenerativa	Pérez, 2020
SWCNT	Proteínas	Medicina general	Ouassil y col., 2022
MWCNT	Quitosán y nHA	Ingeniería de tejidos	Gómez Sánchez, 2020
SWCNT	Lectina de *Phaseolus lunatus*	Cáncer	Aguilar-Vázquez y col., 2021
CNT	Extractos de linaza	Células cancerosas	Kavousi y Chavoshi, 2020

Rozeik y colaboradores investigaron los CNT como materiales para válvulas cardiacas sintéticas, los estudiaron en diversas condiciones ambientales, tomando en cuenta sus propiedades mecánicas, como lo fue su velocidad de deformación y la hidratación, obteniendo como resultados que el incremento de las concentraciones de los CNT disminuye la duración de las válvulas cardiacas. Sin embargo, un resultado positivo fue que el módulo elástico aumento rápidamente al incrementar la tasa de deformación del polímero puro, y esto podría ser de gran utilidad en el desarrollo de las válvulas de polímero compuesto (Tabla 4) (Rozeik y col., 2017). Huang y colaboradores en el 2020 se enfocaron en lo CNT y

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

compuestos poliméricos, por ejemplo: poli(N-isopropilacrilamida) con aplicación en tejidos, haciendo énfasis en el uso de regeneración de tejidos nerviosos, cardiacos y óseo (Tabla 4) (Huang, 2020).

Tabla 4. Nanotubos de carbono con polímeros compuestos para aplicaciones medicas

TIPOS DE NANOTUBOS DE CARBONO	POLIMEROS	APLICACIÓN MEDICA	REFERENCIA
CNT	Polímeros compuestos	Regeneración de tejidos	Rozeik y col., 2017
CNT	Polímeros compuestos	Regeneración de tejidos	Huang y col., 2020

En el 2021 Jain y Tiwari, realizaron en el ámbito biomédico la aplicación de nanotubos de carbono, en órganos delicados del cuerpo tales como los andamios neuronales, la conducción miocárdica y la regeneración de tejidos nerviosos, entre otros. Algunas biomoléculas (ácidos nucleicos, proteínas y pépticos) al interactuar con los CNT mejoran sus propiedades químicas, aumentan la capacidad de penetración en la membrana celular con una carga elevada de fármacos. En general ellos obtuvieron propiedades muy distintas a los precursores que los convierten en excelentes candidatos para las aplicaciones biomédicas. Siendo uno de ellos el tratamiento contra cáncer ya que el CNT tienen un tamaño nano y compacto el cual ayuda a transportar el medicamento de una manera más fácil. Otro es la reparación de lesiones en la medula espinal, donde los CNT apoyan a la segregación neuronal y al crecimiento. La

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

nanocompatibilidad que generan los CNT al combinarse con biomoléculas, los hace candidatos novedosos para investigaciones futuras en los campos de medicina y biología (Tabla 1) (Jain & Tiwari, 2021).

En el año 2022 un estudio realizado por Carlos Figueroa y colaboradores, encontraron que se puede emplear una estrategia para el uso de biomateriales que ayuden al desarrollo de un microambiente el cual proporcione a las células endógenas y exógenas un entorno adecuado para la reparación del tejido. Este estudio tuvo como objetivo el generar una matriz celular, estableciendo un ensamble celular electromecánico y garantizar una función contráctil estable y una vascularización funcional (Tabla 2) (Prohias y col., 2022).

Se ha comprobado que los MWCNT combinados con quitosán y nanohidroxiapatita (nHA) pueden ser utilizados para la ingeniería de tejidos óseos, Gómez Sánchez en el 2020, realizaron un estudio donde utilizaron estos componentes a diferentes concentraciones (3 % de MWCNT, 5 % de nHA). Donde para la incorporación de la matriz de quitosano, las nHA y los MWCNT utilizaron un modelo trifásico. Ellos notaron que la dureza, el módulo elástico reducido y la conductividad tiene una fuerte dependencia de las concentraciones de las nanopartículas (Tabla 3) (Gómez Sánchez, 2020).

Diagnósticos

En el año 2022 J.M González y colaboradores reportaron el diseño de un nanomaterial con SWCNT que se funcionalizó químicamente con ácido fólico, fluoresceína y capecitabina (químico que normalmente se utiliza contra el cáncer de colon), creando un nanomaterial

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

hibrido de SWCNT/II-NCC (nanotubos de carbono de pared múltiple en interacción sinérgica con la celulosa nanocristalina de tipo II), mostrando una mayor actividad a diferencia de la capecitabina contra la línea celular cancerosa Caco-2 (cáncer colorrectal) (Tabla 2) (González-Domínguez y col., 2022).

Andrade Guel y colaboradores en 2012, en su investigación encontraron un método que se ha desarrollado para unir moléculas del ADN (Tabla 1), péptidos y proteínas dentro y fuera de estos. Ellos encontraron que aumento la actividad antimicrobiana de la estructura, mejorando su capacidad de detectar y destruir las células independientes siendo estas cancerígenas o infectadas por otro virus (Andrade Guel y col., 2012).

En el año 2022 Ouassil y colaboradores, realizaron una modelación de proteínas que hicieron crecer en la corona de un nanosensor basado en nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT). En esta modelación los SWCNT y la proteína basada en aminoácidos tienen capacidad de unión, debido a que incluyen un alto contenido de glicinas mostradas en el disolvente y aminoácidos. Este estudio puede servir como una herramienta para concebir cómo es la secuencia de la proteína y su efecto en la unión de los nanotubos (Tabla 3) (Ouassil y col., 2022).

Kulakova y Lisichkin en 2022, registraron que la mejora que hay en el uso de los CNT en los medios biomédicos, es la disminución de tamaño en los elementos de sensores, al igual que su selectividad y mayor sensibilidad. Las propiedades que presentan los CNT son únicas

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

haciendo que sea un candidato ideal para la obtención de sensores bioquímicos basados es este material. Estos sensores tienen la finalidad de que pueden ser utilizados para hacer un diagnóstico mejorado en la salud del ser humano (Tabla 2) (Kulakova & Lisichkin, 2022).

También Zhu y colaboradores en 2017, encontraron que los CNT que contienen ZnO (óxido de zinc) como antiséptico médico, lograron tener una actividad antibacteriana contra *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* y ayudo a regular la osteogénesis de los osteoblastos (Tabla 2) (Zhu y col., 2017)

Área de terapia y diagnósticos

Los CNT han reformado las aplicaciones médicas dándoles un nuevo giro y más amplitud, siendo los tratamientos de cáncer una de las problemáticas más grandes que existe en la actualidad, esto debido a que sus tratamientos suelen ser agresivos para sus pacientes, e inclusive dolorosos. Por lo que un objetivo importante fue la utilización de los CNT en las terapias contra el cáncer de mama, el estudio se enfocó principalmente en la molécula CD44. Esta molécula es receptora en la superficie celular, la migración celular, la proliferación celular, entre otras, además ayuda en la señalización para la supervivencia celular. Es importante enfocar la funcionalización de la superficie hidrofílica, ya que ayudo a la biocompatibilidad y la disminución de la toxicidad de los CNT, así lograron aprovechar su potencial en las terapias y lograron la administración de fármacos. Sin embargo, la toxicidad de los CNT sigue siendo un limitante para estos nanodiseños (Tabla 1) (Jain Singhai & Ramteke, 2020).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Agilar-Vázquez y colaboradores en 2021, lograron establecer la actividad citotóxica y anti proliferativa de NTPCM-IPI (nanotubos de carbono de pared múltiple conjugados con lecitina de *Phaseolus lunatusm*) por medio de ensayos de viabilidad y proliferación celular (líneas celulares carcinoma) dando paso a nuevas terapias contra el cáncer consiguiéndose utilizar como biomarcadores sistemas de detección con alta especificidad (Tabla 3) (Aguilar-Vázquez y col., 2021). Más tarde en el 2022, Thian y colaboradores lograron presentar una plataforma de entrega multimodal contra el cáncer y tratamientos tumorales que incluyen las nanopartículas focalizadas por receptores y estimulantes, las nanopartículas se usan como barrera y se llevan a los principios activos de los farmacéuticos a las zonas tumorales mediante tácticas de orientación pasiva o activa. Se obtuvieron resultados de la versatilidad de los CNT logrando la administración exacta y una liberación detallada mediante el uso sinérgico entre las estrategias versátiles de focalización mediada por receptores y respuestas a los estímulos, dando como resultado la eliminación de las células cancerosas dentro del tumor sin dañar los tejidos sanos (Tabla 2) (Tian y col., 2022).

Los SWCNT, también se han evaluado como agentes de imagen para la estimación y localización de tumores tanto *in vivo* como *in vitro*. Estos muestran propiedades electrónicas particulares que pueden ser observadas en infrarrojo, fluorescencia, fotoacústica y espectroscopia Raman, dando como resultado una detección no invasiva y de alta sensibilidad (Andrade Guel y col., 2012) (Tabla 2) (Ali-Boucetta & Kostarelos, 2013).

Kavousi y Chavoshi en 2020, realizaron estudios donde los NCT funcionalizados se utilizaron como portadores de moléculas en el tratamiento contra el cáncer. Su principal

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

objetivo fue verificar los CNT recubiertos y no recubiertos con conteniendo de extractos de linaza en su línea celular MDA-MB-231, también experimentaron los posibles cambios en la apoptosis inducida calculando la expresión de los genes Bax es un gen apoptótico y Bcl-2. Que este último es un gen anti apoptótico. Teniendo como resultado que la muerte de las células cancerosas tratadas con CNT-nanopartículas de quitosano conllevan al aumento del gen Bcl-2 y la disminución del gen Bax, siendo así el resultante de la inducción de la apoptosis en la célula cancerígena MDA-MB-231 (Tabla 3) (Kavousi & Chavoshi, 2020).

Con base a lo anterior, se visualiza que los nanotubos de carbono han ayudado en gran medida a la medicina, creando nuevas formas de tratamientos que van desde las terapias para el cáncer hasta la creación de tejidos, y aunque aún varias aplicaciones están en investigación y desarrollo, se puede decir que la medicina ha tenido un avance significativo en estas últimas décadas, cabe mencionar que los NTC son nanomateriales que pueden llegar a ser tóxicos para el ser humano debido a su tamaño, sin embargo también se ha encontrado que los SWCNT pueden degradarse, lo cual abre las posibilidades de que los nanomateriales puedan biodegradarse.

CONCLUSIONES

Los CNT son prometedores para el área médica debido a las propiedades químicas y físicas que presentan. Estas nanoestructuras han logrado un avance significativo en el área de investigación como transportadores de fármacos para tratamientos contra el cáncer, siendo de gran utilidad debido a su estructura en los ensayos realizados de viabilidad y proliferación

celular. Otra área de oportunidad para aplicaciones de los CNT es en la medicina regenerativa, donde se utilizan, como aditivos en materiales para la creación de tejidos artificiales. En general la investigación de estas nanoestructuras de carbono sigue siendo de gran interés en nuevos campos en la medicina.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas, a la Facultad de Ciencias Biológicas, a la Maestría en Ciencias y Tecnología de Materiales, de igual manera se agradece la beca con número 826952 otorgada por CONACYT.

REFERENCIAS

Aguilar-Vázquez, J., Pina-Canseco, M. del S., Gochi-Ponce, Y., & Pérez-Santiago, A. D. (2021). Efecto anti-proliferativo en líneas celulares de cáncer de mama y cervico-uterino causado por nanotubos de carbono múltipared—Lectina de Phaseolus lunatus var. Silvester Baudet. *REVISTA BIOMÉDICA*, *32*(2), Art. 2. https://doi.org/10.32776/revbiomed.v32i2.863

Ali-Boucetta, H., & Kostarelos, K. (2013). Carbon nanotubes in medicine & biology—Therapy and diagnostics. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *65*(15): 1897-1898. https://doi.org/10.1016/j.addr.2013.11.002

Andrade Guel, M. L., López López, L. I., & Sáenz Galindo, A. (2012). Nanotubos de carbono: Funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, *43*(3): 9-18.

Anzar, N., Hasan, R., Tyagi, M., Yadav, N., & Narang, J. (2020). Carbon nanotube—A review on Synthesis, Properties and plethora of applications in the field of biomedical science. *Sensors International*, *1*, 100003. https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100003

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Blanco Bea, D., Pérez Tejeda, A., Acuña Pardo, A., & Carreño Cuador, J. (2011). Nanomedicina1: Aspectos generales de un futuro promisorio. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, *10*(3), 0-0.

Caballero Silva, E. I. (2020). *Diseño, construcción y automatización de un sintetizador de nanotubos de carbono mediante arco eléctrico*. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15089

Carvalho, E. L. S., de la Fuente, M., & Seijo Rey, B. (2004). El potencial de los liposomas como formas de administración ocular de fármacos. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*, *79*(4): 151-152.

Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Abasi, M., Hanifehpour, Y., & Joo, S. W. (2014). Carbon nanotubes: Properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*, *9*(1): 393. https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-393

Estructura de los nanotubos de carbono. (2015, septiembre 4). *Cienciadelux*. https://cienciadelux.com/2015/09/04/estructura-de-los-nanotubos-de-carbono/

Gómez Sánchez, A. (2020). *Nanomateriales de Quitosano, Hidroxiapatita y nanotubos de carbono en ingeniería de tejido óseo*. https://repositorio.cinvestav.mx/handle/cinvestav/3485

González Velázquez, V. J. (2015). *Nanomateriales de carbono, síntesis, funcionalización y aplicaciones*. https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/21605

González-Domínguez, J. M., Grasa, L., Frontiñán-Rubio, J., Abás, E., Domínguez-Alfaro, A., Mesonero, J. E., Criado, A., & Ansón-Casaos, A. (2022). Intrinsic and selective activity of functionalized carbon nanotube/nanocellulose platforms against colon cancer cells. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *212*, 112363. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112363

Huang, B. (2020). Carbon nanotubes and their polymeric composites: The applications in tissue engineering. *Biomanufacturing Reviews*, *5*(1): 3. https://doi.org/10.1007/s40898-020-00009-x

Jain, N., & Tiwari, S. (2021). Biomedical application of carbon nanotubes (CNTs) in vulnerable parts of the body and its toxicity study: A state-of-the-art-review. *Materials Today: Proceedings*, *46*: 7608-7617. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.895

Jain Singhai, N., & Ramteke, S. (2020). CNTs mediated CD44 targeting; a paradigm shift in drug delivery for breast cancer. *Genes & Diseases*, *7*(2): 205-216. https://doi.org/10.1016/j.gendis.2019.10.009

Kavousi, M., & Chavoshi, M. S. (2020). Effect of coated carbon nanotubes with chitosan and cover of flaxseed in the induction of MDA-MB-231 apoptosis by analyzing the expression of Bax and Bcl-2. *Meta Gene*, *26*: 100807. https://doi.org/10.1016/j.mgene.2020.100807

Kulakova, I. I., & Lisichkin, G. V. (2022). Biosensors Based on Graphene Nanomaterials. *Moscow University Chemistry Bulletin*, *77*(6): 307-321. https://doi.org/10.3103/S0027131422060049

Mezzasalma, S. A., Grassi, L., & Grassi, M. (2021). Physical and chemical properties of carbon nanotubes in view of mechanistic neuroscience investigations. Some outlook from condensed matter, materials science and physical chemistry. *Materials Science and Engineering: C*, *131*: 112480. https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112480

Núñez del Prado, P. (2021). *Nanopartículas en la terapia contra el cáncer: Estudio comparativo de nanotúbulos de carbono y liposomas en el tratamiento del cáncer*. http://titula.universidadeuropea.com/handle/20.500.12880/88

Ouassil, N., Pinals, R. L., Del Bonis-O'Donnell, J. T., Wang, J. W., & Landry, M. P. (2022). Supervised learning model predicts protein adsorption to carbon nanotubes. *Science Advances*, *8*(1), eabm0898. https://doi.org/10.1126/sciadv.abm0898

Pérez, M. O. G. (2020). Nanomateriales (de carbono) que curan. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, *56*: 9-11.

Portillo, J. J. C., Galindo, A. S., & Facio, A. C. (2017). *Una Nueva Generación de Nanomateriales a Base Carbono para Aplicaciones Biomédicas A New Generation of Carbon-Based Nanomaterials for Biomedical Applications*. *9*(18): 5.

Rojas-Aguirre, Y., Aguado-Castrejón, K., & González-Méndez, I. (2016). La nanomedicina y los sistemas de liberación de fármacos: ¿la (r)evolución de la terapia contra el cáncer? *Educación Química*, *27*(4): 286-291. https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.07.002

Rozeik, M. M., Wheatley, D. J., & Gourlay, T. (2017). Investigating the Suitability of Carbon Nanotube Reinforced Polymer in Transcatheter Valve Applications. *Cardiovascular Engineering and Technology*, *8*(3): 357-367. https://doi.org/10.1007/s13239-017-0313-2

Singh, E., Srivastava, R., Kumar, U., & Katheria, A. D. (2017). Carbon Nanotube: A Review on Introduction, Fabrication Techniques and Optical Applications. *Nanoscience and Nanotechnology Research*, *4*(4), Art. 4. https://doi.org/10.12691/nnr-4-4-1

Tian, H., Zhang, T., Qin, S., Huang, Z., Zhou, L., Shi, J., Nice, E. C., Xie, N., Huang, C., & Shen, Z. (2022). Enhancing the therapeutic efficacy of nanoparticles for cancer treatment using versatile targeted strategies. *Journal of Hematology & Oncology*, *15*(1): 132. https://doi.org/10.1186/s13045-022-01320-5

Zhu, Y., Liu, X., Yeung, K. W. K., Chu, P. K., & Wu, S. (2017). Biofunctionalization of carbon nanotubes/chitosan hybrids on Ti implants by atom layer deposited ZnO nanostructures. *Applied Surface Science*, *400*: 14-23. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.158

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Dimensión fractal de macizos carbonatados fracturados naturalmente. Ejemplo de la formación aurora, noreste de México.

Fractal dimension of naturally-fractured carbonate rocks mass. An example from the aurora formation, northeastern Mexico

[1]Dr. Alberto Hernández Rosales, [1]Dr. Yuri Almaguer Carmenates, [1]M. E. D. Karla Rosalyne Lira Méndez, [1]Dr. Roberto Díaz Martínez, [1]Dr. Felipe de Jesús López Saucedo, [1]Ing. José Humberto Briseño González, [2]Dr. Reinaldo Martínez Cruz.

[1] Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ing., Lic. Adolfo López Mateos. Boulevard Adolfo López Mateos s/n. Nueva Rosita, Coahuila, C P. 26800, México.

[2] Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología. Carretera Apizaquito s/n, San Luis Apizaquito, C.P. 90401, Apizaco, Tlaxcala, México.

Autor de correspondencia:
Alberto Hernández Rosales
Correo electrónico:
alberto_hernandez@uadec.edu.mx
ORCID:0000-0003-0467-3205

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

RESUMEN

Se realizó el cálculo de la dimensión fractal en afloramientos de la Fm. Aurora presente en el anticlinal de la Sierra Santa Rosa, ubicada en Melchor Múzquiz, Coahuila, México. Los afloramientos estudiados fueron identificados como Macizo Rocoso α, Macizo Rocoso β y Macizo Rocoso δ. En primer lugar, se tomaron fotografías de alta calidad, para identificar los sistemas de discontinuidades e irregularidades vinculados con la estratificación y fracturas tectónicas; a esas imágenes se les dio un tratamiento especial, éste consistió en resaltar las fracturas (proceso de vectorización) o irregularidades presentes; posteriormente, se aplicó el método de conteo de cajas "box-counting" para determinar la nube de puntos de la forma $\left(\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right), \log\left(N(\varepsilon)\right)\right)$. Finalmente, se aplicó regresión lineal por el método de mínimos cuadrados para aproximar la Dimensión Fractal (DF). El método de conteo de cajas fue aplicado usando 90 diferentes tamaños de celda (tamaño de caja) con 20 diferentes posiciones de la cuadrícula o mallado; dicho método fue aplicado usando el software ImageJ y el plugin FracLac; posteriormente, se calculó el promedio de las dimensiones fractales para las 20 diferentes posiciones de la cuadrícula, con el objetivo de observar y estudiar el comportamiento entre el grado de fracturación y la DF. Como resultados, se observó que el Macizo Rocoso δ presenta mayor DF, de 1.6477 en promedio a diferencia de los Macizos Rocosos α y β, con DF promedio de 1.2924 y 1.5158, respectivamente. La DF presente en el Macizo Rocoso δ, se debe a que presenta mayor cantidad de discontinuidades (irregularidades); este comportamiento se vincula al menor espesor de los estratos caracterizados por estratificación media a fina y por lo tanto, una mayor fragilidad de los estratos frente a los procesos tectónicos, dando como resultado un macizo intensamente fracturado. Por lo tanto, en base al espaciamiento que presenta las diaclasas y una menor cantidad de fracturas los Macizos Rocosos α y β tienen una DF promedio de 1.2924 y 1.5158, respectivamente.

Palabras clave: *Fractales, fracturas, geometría fractal, conteo de cajas, dimensión fractal, macizo rocoso.*

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

ABSTRACT

Fractal dimension calculations were conducted on outcrops of the Aurora Formation present in the Santa Rosa anticlinal, located in Melchor Múzquiz, Coahuila, Mexico. The outcrops studied were identified as Rock Massif α, Rock Massif β, and Rock Massif δ. First, high-quality photographs were taken to identify the systems of discontinuities and irregularities linked to stratification and tectonic fractures. The photographs were then subjected to a special treatment consisting in highlighting the fractures (vectorization process) or irregularities present. The box-counting method was then applied to determine the point cloud, in the form $\left(\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right), \log(N(\varepsilon))\right)$. Finally, a linear regression was applied, using the least squares method to approximate the fractal dimension (FD). The box-counting method was applied using 90 different cell (box) sizes with 20 different positions on the grid, with the method applied using the ImageJ software and the FracLac plugin. The average fractal dimensions were then calculated for the 20 different positions on the grid, in order to observe and study the interaction between the degree of fracturing and the FD. It was observed that Rock Massif δ presented a higher average FD, 1.6477, than Rock Massifs α and β, which presented an average FD of 1.2924 and 1.5158, respectively. The FD values present in Rock Massif δ are due to the higher number of discontinuities (irregularities), which is linked to the lesser thickness of the strata characterized by a medium to fine stratification and, therefore, to the greater fragility of the strata in the presence of tectonic processes, resulting in an intensely fractured massif. Therefore, based on the spacing of the joints and the lower number of fractures, Rock Massifs α and β present an average FD of 1.2924 and 1.5158, respectively.

Key words: *Fractals, fractures, fractal geometry, box-counting, fractal dimension, rock mass.*

1. Introducción

La Geometría Euclidiana (clásica) bien pudo haber sido la herramienta que uniera la ciencia matemática con las formas de la naturaleza y el universo mismo. Pero ¿por qué se ha

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

considerado como algo ineficaz y poco interesante o aplicable? Una de las razones es por falta de capacidad para describir las formas de la naturaleza y el universo. La limitación de la Geometría Euclidiana se debe a que tiende a perder su estructura cuando se amplían los objetos geométricos, por ejemplo, un arco de círculo se transforma poco a poco en una línea recta y la superficie de una esfera se hace cada vez más plana (González y col., 2019).

Benoit Mandelbrot (1924-2010) mencionó que ni las nubes son esferas, ni las montañas cónicas, y tampoco las costas circulares (Mandelbrot, 1982). Mandelbrot es considerado padre de la geometría fractal; aunque en los años 20 ya había indicios de la geometría fractal, con los estudios de los matemáticos franceses Gaston Julia (1893-1978) y Pierre Fatou (1878-1929) (Fatou, 1920; Fatou, 1926) y (Gaston, 1978). Gleick (2008) menciona que las formas en la naturaleza son más complejas: es una geometría del "picado, acribillado, dislocado, retorcido, enredado y entrelazado". Mandelbrot (1967) llama "fractal" a objetos geométricos cuya estructura es irregular. Según Mandelbrot, la palabra fractal proviene del latín *fractus*, que significa "quebrado o fracturado", del verbo frangere, "romper". Rodríguez y col. (2014) mencionan que los fractales se distinguen de las formas de la geometría euclidiana, la cual estudia objetos geométricos simples.

La geometría fractal es reciente en la matemática, su desarrollo se ha acelerado debido a su diversidad de aplicaciones en diferentes campos de la ciencia y la tecnología, gracias al desarrollo informático (González y col., 2019). Esta geometría estudia formas altamente irregulares generadas a través de procesos recursivos (iterativos) que tienen como característica fundamental la autosimilitud y dimensión no entera (González y col., 2019). La mayoría de las formas de la naturaleza tienen una forma fractal, donde existe un caos y un orden. Algunos ejemplos de formas naturales son: los perfiles costeros, la hoja de un helecho, las fronteras de los paisajes, la superficie rugosa de una roca, el ramaje de un arbusto, la ramificación alveolar en los pulmones, la frontera de una nube y las fluctuaciones de precios en un mercado (Talanquer, 2011). En la actualidad, la geometría fractal es muy aplicada en la física, medicina, computación, química, biología, economía, fisiología, arte, etc. ya que ha permitido reformular y resolver problemas complejos de una forma muy

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

simplificada (Alfaro y col., 2010). En la Figura 1 se muestran algunos ejemplos de fractales naturales.

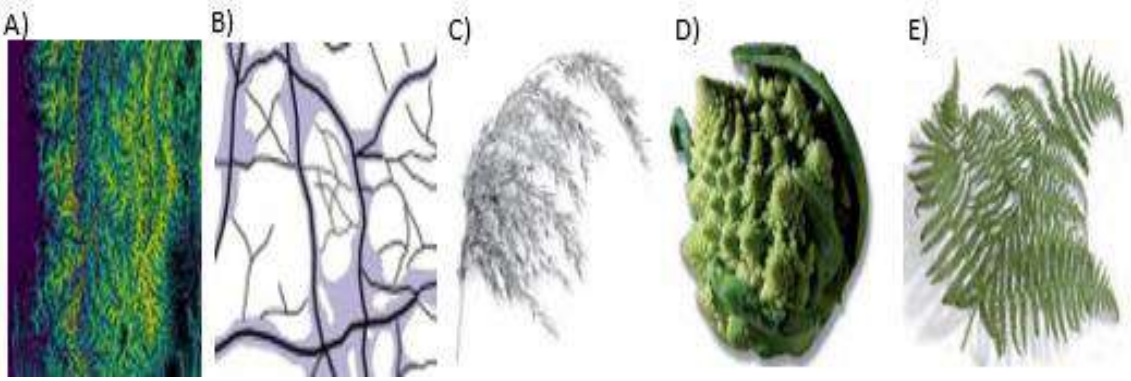


Figura 1. Ejemplos de formas o sistemas complejos de la naturaleza. A) Red de drenaje superficial, fuente: (Martínez y col., 2020). B) Sistema de fractura, fuente: (Gumiel y Arias, 2005). C) Rama de un árbol, D) Brócoli, y E) hoja de un helecho, fuente: (Rubiano, 2009).

Uno de los fractales más famosos, que lleva el nombre de Benoit Mandelbrot, se aprecia en la Figura 2 B) (Cruz, 2017); este fractal nace de la iteración de la función de variable compleja $f_c(z) = z^2 + c$, donde z y c son números complejos. Revisar (Barnsley, 1993) para más información sobre el conjunto de Mandelbrot. En la Figura 2 se muestran dos planos de parámetros fractales de funciones no lineales, obtenidos de la iteración de esas funciones de variable compleja.

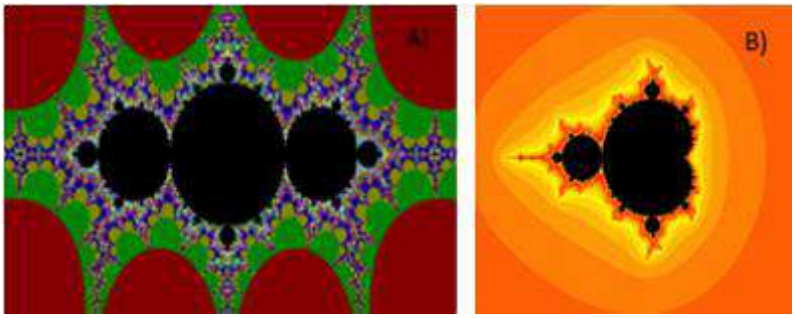


Figura 2. Fractales no lineales. A) Plano de parámetros de la familia $f_\lambda(z) = \lambda sen(z)$ (Domínguez y Sienra, 2002). B) Plano de parámetros (Conjunto de Mandelbrot) de la familia $f_c(z) = z^2 + c$, con z, c números complejos (Rubiano, 2009; Cruz, 2017).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Podemos citar otros ejemplos de objetos fractales matemáticos, también llamados fractales clásicos, tales como la Isla de Koch, Esponja de Sierpinsky-Menger (Mandelbrot, 1975), Tapete de Sierpinsky (Mandelbrot, 1997), Triángulo de Sierpinsky y Conjunto de Cantor (Falconer, 2003). La Figura 3 muestra algunos fractales lineales (clásicos) y no lineales.

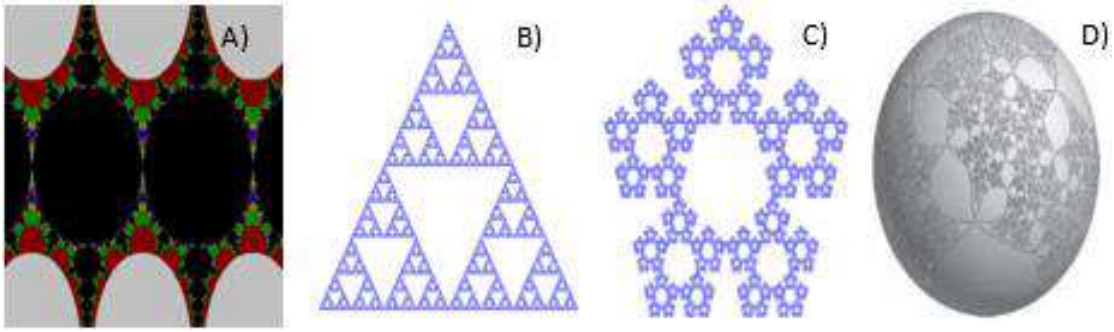


Figura 3. Fractales lineales y no lineales. A) Plano dinámico de la Familia $f_\lambda(z) = \lambda\, Sen(z)$ para $\lambda = 1$, fuente: (Domínguez y Sienra, 2002). B) Triángulo de Sierpinsky (creación propia). C) Pentágono de Sierpinsky (creación propia). D) Proyección en la esfera del plano dinámico de la familia de funciones $f_c(z) = z^2 + c$, cuando $c = -0.125 + 0.65i$, fuente: (Rubiano, 2009).

Por otro lado, la geología de cualquier área determinada siempre será esencialmente heterogénea; no existe un macizo rocoso, estructura geológica o formas del relieve que sean exactamente igual a otra, aun estando muy próximos; pero si se mantiene una especie de semejanza estadística. En la literatura científica se pueden encontrar una diversidad de trabajos de aplicaciones de los fractales en la solución de diversos problemas geológicos. En este sentido, se mencionan algunos trabajos donde la geometría fractal ha sido aplicada dentro del área de la geología: análisis de la anisotropía de la dimensión fractal de fallas (Pérez-López y col., 2005; Davarpana y Babaie 2013), análisis cartográfico de la dimensión fractal para la variación espacio-temporal de ríos (González y col., 2019), distribución fractal de fallas y venas vinculadas a fallas (Cello, 1997; Ake, 2011), uso del modelo fractal para

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

caracterizar la distribución de tamaño de partícula en suelos (Filgueira y col., 2002), estudios de la dimensión fractal de estilolitas (Karcz y Scholz, 2003). Se pueden mencionar otras aplicaciones de los fractales en geomorfología, como análisis fractal de canales de mareas en estuarios (Angeles y col., 2004), comportamiento fractal del modelo de evolución fluvial (Pelletier, 2007), análisis fractal de fuentes fluviales y su relación con la evolución tectónica regional (Shen y col., 2011), propiedades fractales de accidentes geográficos (Lisi y col., 2012), también se reporta los trabajos de Ramírez-Hernández y col. (2017), Ramírez-Hernández y Cáceres-Govea (2017) en redes fluviales de Pinar de Río, Cuba, quienes han estudiado redes de drenaje desde el punto de vista de la geometría fractal. También, morfometria y fractalidad en redes de drenaje de cuencas chilenas (Martínez y col., 2020). Finalmente, Hernández y col. (2021) estudian las relaciones de las caracteristicas geológicas y la dimension fractal de las Sierras de Obayos y Santa Rosa, del estado de Coahuila.

Sobre estudios de yacimientos naturalmente fracturados y cuantificación de procesos geologicos se pueden citar los trabajos de Miranda y col. (2006) y Ascencio y Posadas (2018), Gumiel y Arias (2005); se reportan trabajos de la aplicación de la teoría fractal para la estimación de la distribución geometríca de fallas en macizos rocosos (Moná y col., 2019), análisis fractal de fracturas geológicas en un análogo expuesto de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados y su aplicación en modelos de flujo de fluidos (Vásquez-Serrano, 2013), identificación y modelado de fracturas naturales en pozos de hidrocarburos utilizando registros de imágenes resistivas y datos de dimensión fractal (Leal, 2013), así como trabajos relacionados con la cuantificación de anisotropía en patrones de fractura tectónica (Volland y Kruhl, 2004).

De acuerdo con las investigaciones mencionadas anteriormente, se aprecia una amplia aplicación de los fractales en la geología estructural, relacionada con sistemas fracturados. En este sentido, es posible aplicar la geometría fractal para el estudio de las irregularidades geológicas vinculadas con la presencia de discontinuidades en formaciones geológicas, ya sean asociadas a los procesos genéticos que dieron origen a las rocas, o a los procesos deformacionales posteriores a su formación. Por tales motivos, en la presente investigación se realiza un análisis de la dimensión fractal de macizos carbonatados fracturados

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

naturalmente, tomando como referencia la formación Aurora presente en la región carbonífera de Coahuila, al noreste de México. Esto se justifica porque a simple vista se observa en la Fm. Aurora una característica que identifica los fractales naturales que es irregularidad y/o fragmentación.

1.1. Descripción geológica del área estudiada.

El área de estudio está conformada por capas de caliza de la Fm. Aurora; su estructura está representada por diaclasas, plegamientos, superficies estilolíticas y de cizallas (González y col., 2007; Medina-Martínez, 2021). Por lo tanto, los trabajos se han realizado sobre un medio discontinuo que presenta heterogeneidad y/o anisotropía, tal como se define para los macizos rocosos (Ramírez y Alejano, 2004). El macizo rocoso conformado por la Fm. Aurora está afectado por discontinuidades, vinculadas tanto a estructuras primarias como secundarias. Las estructuras primarias tales como la estratificación y estilolitas, se originaron simultáneamente a la formación de las calizas como resultado de procesos diagenéticos (Salazar, 2018); las estructuras secundarias fueron formadas fundamentalmente durante la deformación laramídica (González y col., 2007).

Geológicamente la Fm. Aurora se describe como caliza de estratificación delgada a masiva de color gris a ocre, con cantidad variable de pedernal en forma de nódulos irregulares y concreciones; presenta intercalaciones de lutita calcárea gris (González y col., 2007); los nódulos de pedernal son de color gris a negro e intemperizan a ocre oscuro. PEMEX (1988) considera que la caliza es de tipo *wackestone – packestone* y *grainstone* en estratos masivos, con macrofauna de rudistas (caprínidos y toucasias) y microfauna de miliólidos, así como fragmentos de algas, entre otros.

2. Materiales y métodos

Para determinar la dimensión fractal de los Macizos Rocosos α, β y δ (Figura 9), se utilizó la siguiente metodología:

2.1. Etapa de revisión de conceptos básicos de análisis fractal

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

En esta etapa se describen los conceptos necesarios para la obtención de la dimensión fractal de los Macizos Rocosos α, β y δ. Dichos conceptos matemáticos, son relevantes para el análisis fractal.

2.1.1. Dimensión fractal

Una forma de medir cuantitativamente el grado de complejidad, irregularidad o fragmentación de un sistema es expresándolo como una "dimensión" (Dubois, 1995).

Primero describiremos la relación que existe entre el número de copias necesarias de tamaño o escala ϵ para cubrir un objeto geométrico de dimensión 1, 2 y 3.

A partir de un segmento de línea de longitud 1, se puede escalar el segmento por $\frac{1}{2}$ y observar 2 copias de longitud $\frac{1}{2}$, que cubren el segmento original. Se necesitan 3 segmentos escalados por $\frac{1}{3}$, 4 segmentos escalados por $\frac{1}{4}$, etc. Notemos que se cumple lo siguiente en esta dinámica matemática, $2 = \frac{1}{\frac{1}{2}}, 3 = \frac{1}{\frac{1}{3}}$ y $4 = \frac{1}{\frac{1}{4}}$. Generalizando este proceso tenemos que el número de segmentos de escala ϵ es $N(\epsilon)$, así, se obtiene la relación $N(\epsilon) = \frac{1}{\epsilon}$, observe Figura 4.

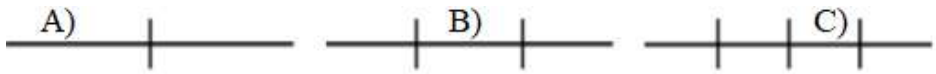


Figura 4. Proceso de escalado en una dimensión. A) escalado por $\frac{1}{2}$, B) escalado por $\frac{1}{3}$, y C) escalado por $\frac{1}{4}$. Fuente: (Gutiérrez, 1998).

Ahora, para cubrir un cuadrado de lado 1 se necesitan 4 copias de un cuadrado escalado por $\frac{1}{2}$. Similarmente, se necesitan 9 cuadrados escalados por $\frac{1}{3}$, 16 cuadrados escalados por $\frac{1}{4}$, etc. Notemos que se cumple lo siguiente: $4 = \left(\frac{1}{\frac{1}{2}}\right)^2, 9 = \left(\frac{1}{\frac{1}{3}}\right)^2$ y $16 = \left(\frac{1}{\frac{1}{4}}\right)^2$. En general, $N(\epsilon) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^2$, observe la Figura 5.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

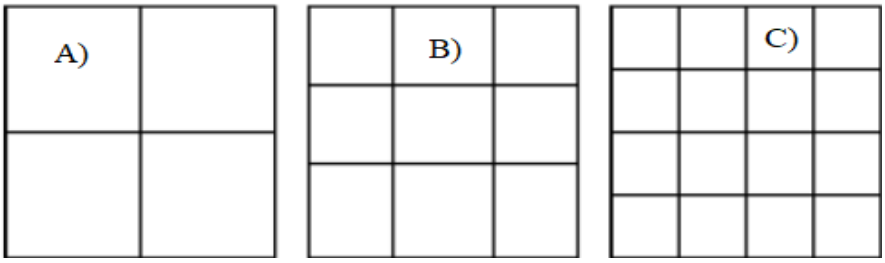


Figura 5. Proceso de escalado en dos dimensiones. A) escalado por $\frac{1}{2}$, B) escalado por $\frac{1}{3}$ y C) escalado por $\frac{1}{4}$. Fuente: (Gutiérrez, 1998).

De forma análoga, para cubrir un cubo de lado 1 se necesitan 8 copias de cubos escalados por $\frac{1}{2}$. Similarmente, se necesitan 27 cubos escalados por $\frac{1}{3}$, 64 cubos escalados por $\frac{1}{4}$, etc. Observemos que se cumple lo siguiente: $8 = \left(\frac{1}{\frac{1}{2}}\right)^3$, $27 = \left(\frac{1}{\frac{1}{3}}\right)^3$ y $64 = \left(\frac{1}{\frac{1}{4}}\right)^3$. En general, se obtiene que $N(\epsilon) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^3$, observe la Figura 6.

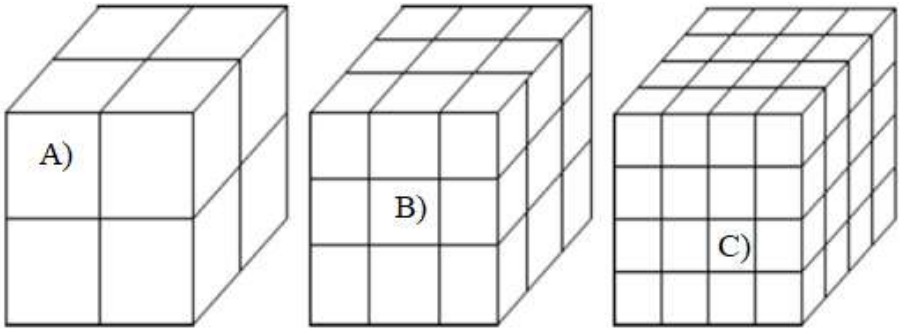


Figura 6. Proceso de escalado en tres dimensiones. A) escalado por $\frac{1}{2}$, B) escalado por $\frac{1}{3}$ y C) escalado por $\frac{1}{4}$. Fuente: (Gutiérrez, 1998).

Para líneas, cuadrados y cubos se ve inmediatamente una relación entre el factor de escala ϵ y el número $N(\epsilon)$ de copias de una forma similar, necesarios para cubrir el cuerpo original. Representado por d la dimensión Euclidiana de estas formas o cuerpos, la relación está dada por la Ecuación (1).

$$N(\epsilon) = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^d. \quad (1)$$

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Despejando d de (1) obtenemos la Ecuación (2), (Rubiano, 2009) que se utiliza para el cálculo de la dimensión de Hausdorff.

$$d = \frac{ln(N(\epsilon))}{ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right)}. \quad (2)$$

Si la relación de escala se mantiene mediante la Ecuación (1) para una forma, entonces el parámetro d (Ecuación (2)) es la dimensión de Hausdorff fractal de dicha forma o figura geométrica. En este sentido, podemos aplicar estas ecuaciones a cualquier objeto autosimilar, incluidos fractales lineales (exactamente iguales a diferentes escalas), pero no a los fractales naturales (Rubiano, 2009; Toro y col., 2007). Los objetos autosimilares (fractales lineales o clásicos) son de fácil manejo, la curva de Koch, el polvo o el conjunto de Cantor etc., pero en la naturaleza existen objetos con alto grado de autosimilitud, que no son exactamente iguales, esto es lo que se denomina autosimilitud estadística (Mandelbrot, 1982). Para hacer frente a este problema se debe recurrir a métodos como el de Barton, que en términos generales se basa en asociar el tamaño de un conjunto de puntos con el tamaño de los elementos que lo recubren (Barton y La Pointe, 1995); para más información se puede consultar (Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1997).

Hausdorff (1919) desarrolló una generalización métrica del concepto de dimensión de un espacio topológico, que permite definir una dimensión fraccionaria para un objeto fractal dentro de un espacio de dimensión no nula, (Falconer, 2003; Alfaro y col., 2010). Besicovitch (1929) empleó la dimensión de Hausdorff para medir y dimensionar estos conjuntos, véase también (Falconer, 2003; Alfaro y col., 2010). Hurst (1957) por su parte enunció la ley que estudió el efecto de la invarianza al cambio de escala en series. La invarianza al cambio de escala es la propiedad cualitativa fundamental para definir un conjunto fractal y su expresión matemática es la ley de potencias. Ambos comportamientos aparecen en series espaciales (geometría y forma), como en series temporales (distribución de un fenómeno a lo largo del tiempo) (Caicedo-Ortiz y col., 2017).

El análisis fractal ofrece una herramienta que permite caracterizar de forma geométrica estructuras y propiedades de entidades complejas. A partir del cálculo de la dimensión fractal.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

La generalización de la dimensión geométrica nos permite diferenciar entre estructuras en base a su complejidad que presentan (Caicedo-Ortiz y col., 2017; Rubiano, 2009).

2.1.2. Dimensión de Hausdorff – Besicovich.

Definición: Una colección $\mathcal{A}$ de subconjuntos del espacio X se dice que cubre X, o que es un cubrimiento de X, si la unión de los elementos de $\mathcal{A}$ coincide con X (Munkres, 2002).

Sea U_i un recubrimiento (cubrimiento o cubierta) de A, donde el ancho de todos los intervalos U_i, satisface $w(U_i) \leq r$, con w real. La medida m_r está definida por la Ecuación (3), para más información se sugiere revisar (Falconer, 2003), (Alfaro y col., 2010; Caicedo-Ortiz y col., 2017).

$$m_r(A) = \inf\left(\sum_{i=0}^{\infty} w(U_i)\right), \tag{3}$$

donde el ínfimo (o el más grande de los valores mínimos) se toma sobre todos los r-cubrimientos de A.

Caicedo- Ortiz y col. (2017) hablan de la dimensión de Hausdorff – Besicovitch de A y se define por la Ecuación (4), para más información se sugiere revisar (Falconer, 2003; Alfaro y col., 2010).

$$D_{H-B} = \lim_{r \to 0} m_r(A). \tag{4}$$

2.1.3. Método de conteo de cajas (box-counting) para la aproximación de la dimensión fractal.

El algoritmo Box-Counting (conteo de cajas) viene a generalizar en objetos naturales el método de cálculo de la dimensión fractal en objetos autosimilares, mediante generalizaciones apropiadas (González y col., 2019; Rubiano, 2009).

El Método de Box-Counting también conocido como dimensión de capacidad, es la forma práctica más utilizada para estimar la dimensión fractal de un objeto. La mecánica de esta técnica consiste en realizar un mallado regular superpuesto a un conjunto fractal, caracterizado por el tamaño de malla (lado o diagonal de la celda que define la malla). Se cuenta el número de cajas que recubren a ese conjunto fractal. Variando el tamaño de la malla se realizan diferentes recubrimientos del conjunto fractal donde ϵ es el tamaño de la malla

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

(escala) y $N(\epsilon)$ el número de celdas que recubren o interceptan en parte el conjunto fractal (Caicedo-Ortiz y col., 2017; Rubiano, 2009).

Se sabe que $N(\epsilon)$ es el número de cajas de la malla de tamaño ϵ tocando cualquier parte de la forma o fractal, supongamos que se cumple:

$$N(\epsilon) = k\left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{d}, \tag{5}$$

donde k es la constante de proporcionalidad, esta constante es 1 en los ejemplos anteriores (rectas, cuadrados y cubos) (González y col., 2019). Aplicando logaritmos a la Ecuación (5), se obtiene

$$log(N(\epsilon)) = d\, log\left(\frac{1}{\epsilon}\right) + log(k). \tag{6}$$

En la Ecuación (6) d y k son constantes y $\log(N(\epsilon))$ y $\log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)$ están en función de ϵ, por tanto la Ecuación (6), tiene la forma de una ecuación lineal $y = mx + b$, que es la ecuación de una recta con pendiente d, donde la variable dependiente sería $\log(N(\epsilon))$ y la independiente $\log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)$. Sabemos que d interpreta la dimensión en la escala original, más general d se interpreta como una dimensión. A d se le conoce como dimensión Box-Counting.

La dimensión Box-Counting puede ser calculada para fractales lineales o clásicos. En general, más detalles son revelados con valores de ϵ más pequeños. De la Ecuación (6) se tiene:

$$d = \lim_{\epsilon \to 0}\left(\frac{log\, N(\epsilon)}{log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)} - \frac{log(k)}{log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)}\right), \tag{7}$$

y debido a que k es constante, se tiene $\frac{log(k)}{log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)} \to 0$ cuando $\epsilon \to 0$. Por lo tanto, la Ecuación (7) es

$$d = \lim_{\epsilon \to 0}\left(\frac{log(N(\epsilon))}{log\left(\frac{1}{\epsilon}\right)}\right). \tag{8}$$

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

La Ecuación (8) define la dimensión fractal por conteo de cajas para fractales matemáticos (Clásicos) (Barnsley, 1993; Falconer, 2003; Alfaro y col., 2010).

Los fractales naturales no contienen copias similares de sí mismos, ¿cómo podemos cuantificar su dimensión si no hay aparentemente un factor de escala? (González y col., 2019).

Para fractales naturales con un rango de escala limitada, este límite (Ecuación (8)) no es el enfoque más acertado debido a la no existencia de la autosimilitud exacta, en este caso: la existencia de una dimensión fractal única se demuestra con una buena correlación de la recta de regresión de los puntos $\left(\log\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right), \log(N(\epsilon_1))\right), \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right), log(N(\epsilon_2))\right), \cdots, \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_N}\right), log(N(\epsilon_N))\right)$, empleando el método de mínimos cuadrados (Caicedo-Ortiz y col., 2017), donde la pendiente de la recta de regresión da la dimensión fractal (dimensión box-counting).

Detalles sobre el método de Box-Counting y cálculo de la dimensión fractal de fractales naturales se puede encontrar en los trabajos de (Mandelbrot, 1982; Barton y La Pointe, 1995; Turcotte, 1997).

2.1.4. Colocación de la malla para el método de Box-Counting.

En diferentes literaturas se trata un fenómeno muy importante que es la colocación de la malla o grilla para el cálculo de la dimensión fractal y la influencia que presenta sobre el resultado final (Sabogal y Arenas, 2011; García y col., 2017; López y Jurado, 2011; Robinson, 2011). La colocación de la malla sobre el conjunto fractal analizado es muy importante, porque la elección realizada trae consigo variaciones importantes en el cálculo de los valores de $N(\epsilon)$, a partir de cada tamaño de caja ϵ (Loehle, 1994; Sabogal y Arenas, 2011). Una colocación exacta sobre la figura o conjunto fractal permite que la dimensión fractal no pase o exceda de dos, manteniendo el sentido de la dimensión como la capacidad que posee el conjunto fractal de llenar el espacio que lo contiene (González y col., 2019), observe la Figura 7.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

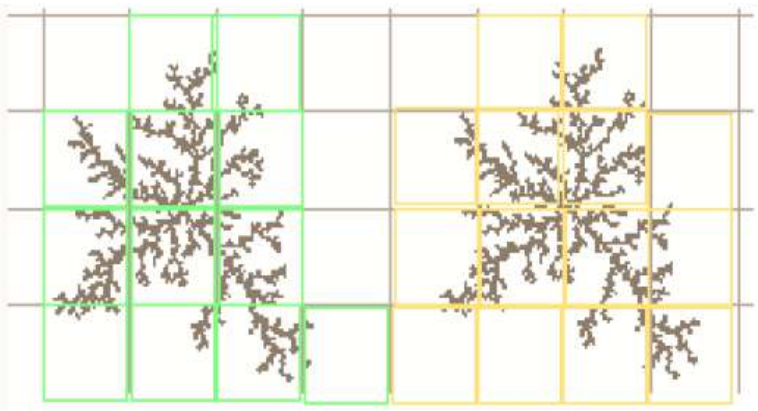


Figura 7. Representación de la malla con diferentes colocaciones para aplicar el método de Box-Counting. Fuente: (González y col., 2019).

Atencia (2014) menciona que la dimensión por el método de box-counting es más eficiente porque recubre al fractal con un conjunto de cajas pequeñas del mismo tamaño ε a diferencia de la dimensión de Hausdorff, que también hace recubrimientos pequeños, pero de tamaños distintos. La Figura 8 muestra el proceso de box-counting.

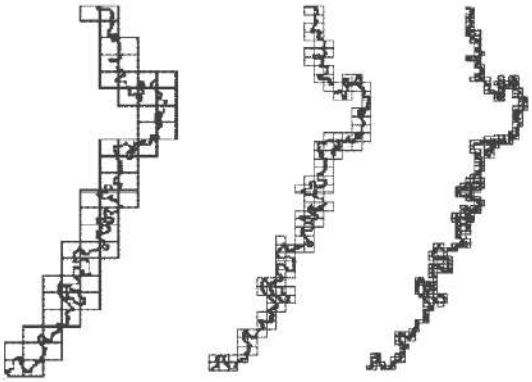


Figura 8. Proceso del método de Box-Counting a un objeto irregular (Toro y col., 2007).

2.2. Etapa de adquisición de información

Se realizó la búsqueda de información pragmática sobre la aplicación de la geometría fractal a diversos cuerpos geológicos como son macizos rocosos o yacimientos naturalmente fracturados. Igualmente fue adquirida la información geológica a través del portal del

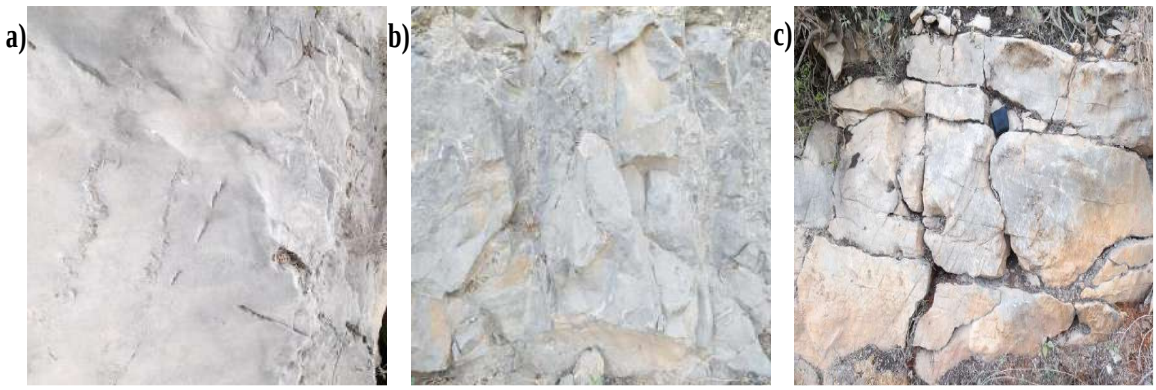
Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Servicio Geológico Mexicano (SGM), donde fue posible descargar la Carta geólogo minera de la zona de estudio (Melchor Múzquiz G14-A12) a escala 1:50 000 (SGM, 2003), así como la descripción de la formación geológica obtenida en el enlace del Léxico Estratigráfico de México (SGM, 2021). Esta información permitió realizar una caracterización previa de la formación geológica a estudiar y tener conocimiento de la estructura general de la misma; además permitió identificar las áreas más idóneas para acceder a los afloramientos y estudiar los macizos rocosos.

2.3. Etapa de reconocimiento de campo y selección de afloramientos.

El reconocimiento de campo fue realizado sobre la base de la elección de las zonas de interés en la etapa de trabajo anterior. El objetivo de los trabajos de campo fue la identificación y caracterización de los afloramientos de caliza de la Fm. Aurora. La elección de esta formación está dada por su aflorabilidad en el flanco NE del anticlinal que conforma la Sierra Santa Rosa. Además, por su variabilidad en la intensidad de las discontinuidades debido al fracturamiento y espesor de las capas, características fundamentales para investigar la fractalidad.

Una vez identificados los afloramientos, fueron tomadas fotos de alta resolución con una cámara Nikon. De la serie de fotografías tomadas, se seleccionaron tres fotografías, de lugares diferentes, que cumplieran con las características requeridas (fracturamiento de baja, mediana y alta intensidad), véase Figura 9; las imágenes seleccionadas se identifican como los Macizos Rocosos α, β, y δ, caracterizados por diferencias en la densidad o intensidad de fracturamiento.



Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Figura 9. a) Macizo Rocoso α de baja intensidad de fracturamiento; b) Macizo Rocoso β intensidad de fracturamiento media; c) Macizo Rocoso δ intensidad de fracturamiento alta.

2.4. Etapa de procesamiento y análisis fractal

Las imágenes obtenidas en el campo fueron procesadas con el software Surfer versión 22.1, aplicando un proceso de vectorización de las imágenes seleccionadas (Macizo Rocoso α, β, y δ). Este tratamiento o proceso de vectorización consistió en resaltar las fracturas o irregularidades presentes, asociadas con las discontinuidades naturales, y obtener una imagen esqueletizada de las mismas, véase Figura 10. Este proceso permitió obtener ficheros vectoriales de cada imagen tratada.

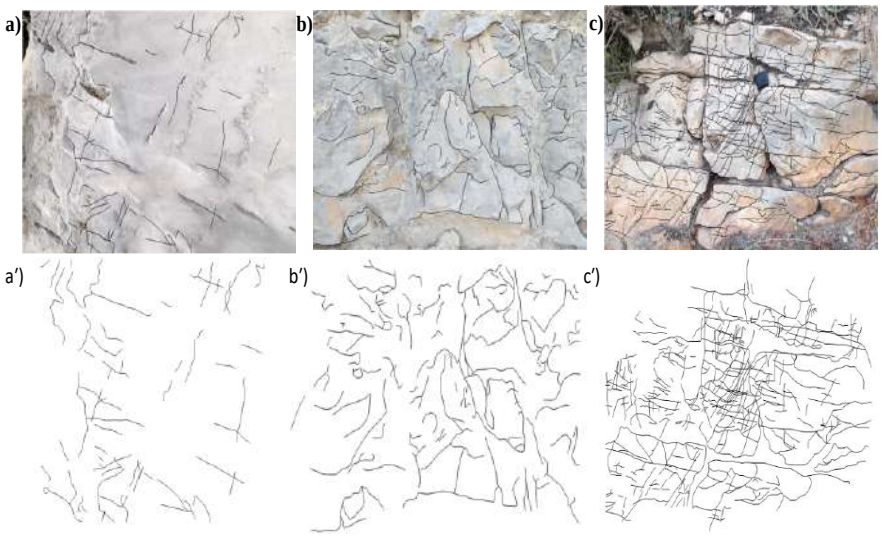


Figura 10. Vectorización de discontinuidades. a) Macizo Rocoso α; b) Macizo Rocoso β; y c) Macizo Rocoso δ, con sus respectivas fracturas resaltadas. Proceso de vectorización mediante el software Surfer: a') esqueleto del Macizo Rocoso α; b') esqueleto del Macizo Rocoso β; y c') esqueleto del Macizo Rocoso δ.

2.5. Análisis fractal

Para la determinación de la dimensión fractal o fractalidad de los Macizos Rocosos α, β, y δ, se convirtieron los ficheros vectoriales a un formato binario, por lo cual sólo se aprecian dos colores: negro (Valor de gris 0) correspondiente a las discontinuidades, y blanco (valor

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

de gris 255) como valor de fondo (Figura 11). El proceso de transformación de las imágenes (binarización) se realizó con el software libre ImageJ (https://imagej.nih.gov/ij/download.html).

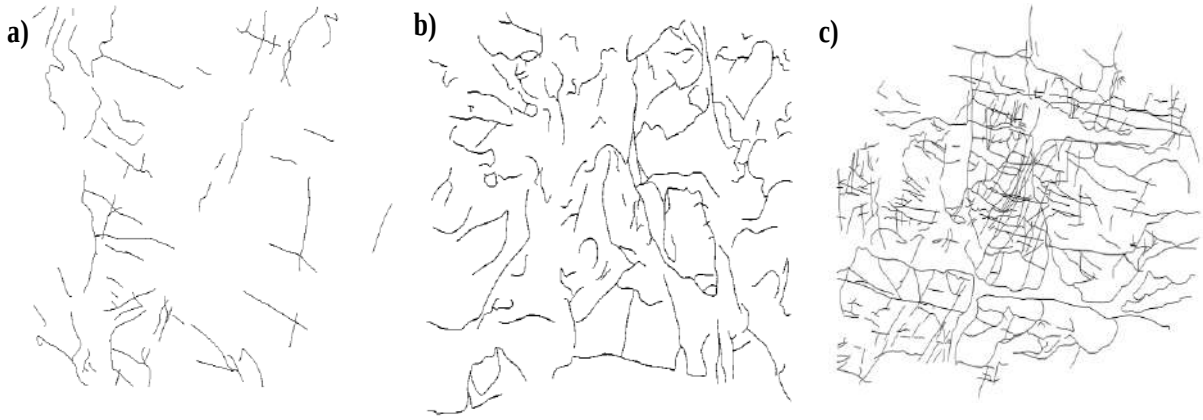


Figura 11. a) Esqueleto del Macizo Rocoso α con su respectivo tratamiento de binarización, b) Esqueleto del Macizo Rocoso β con su tratamiento de binarización, c) Esqueleto del Macizo Rocoso δ con su respectivo tratamiento de binarización.

Posterior al proceso de preparación, esqueletización (vectorización) y binarización de las imágenes, se procedió al cálculo de la dimensión fractal usando el método de *Box-Counting (conteo de cajas)* mediante el plugin FracLa (Karperien, 2013), el cual es una aplicación desarrollada para el software ImageJ (Figura 12). La Figura 12 muestra un ejemplo del proceso del método de *Box-Counting*, en ellas observamos la variación del tamaño de celda (caja) en el mallado o cuadrícula. Este procedimiento se realizó para 20 diferentes posiciones de la cuadrícula o malla, empleando 90 diferentes tamaños de celda en la cuadrícula por cada imagen. Se obtienen 20 dimensiones fractales por cada imagen.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

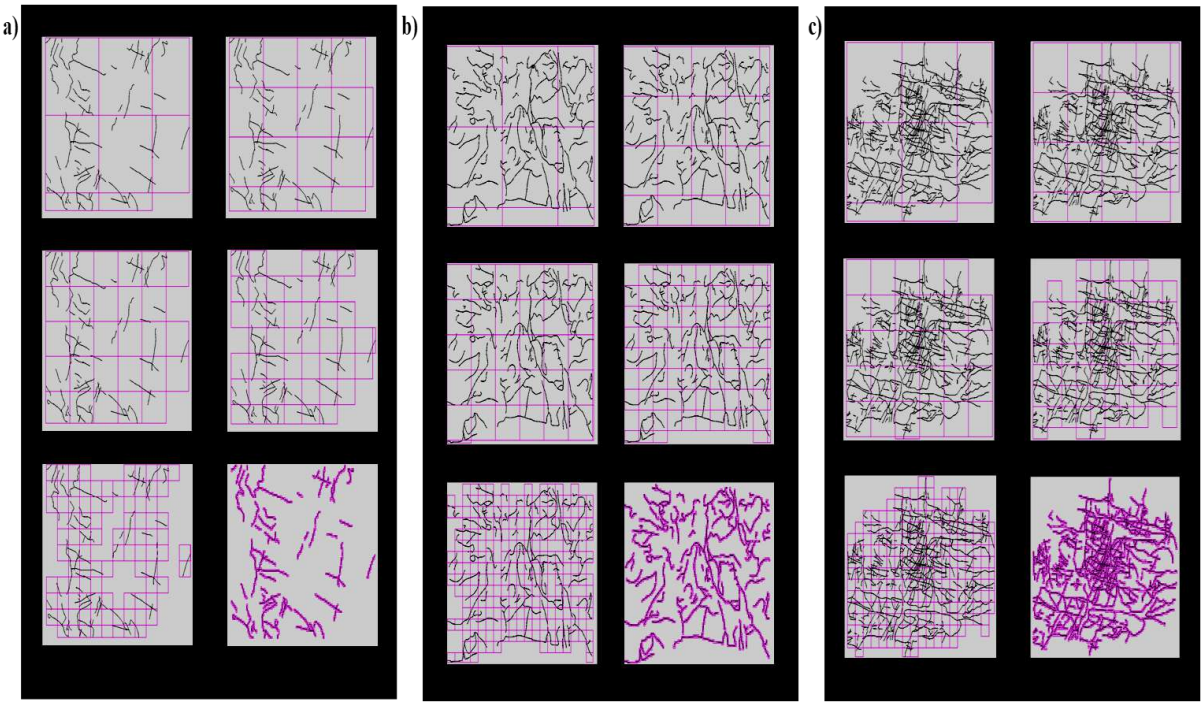


Figura 12. Representación de algunas configuraciones de la malla o cuadrícula por conteo de cajas (Box-Counting) usando el plugin FracLac para los macizos rocosos de la Sierra de Santa Rosa a) Macizo Rocoso α, b) Macizo Rocoso β y c) Macizo Rocoso δ.

2.5.1. Etapa de interpretación

Para la determinación de la dimensión fractal de las imágenes de los Macizos Rocosos α, β, y δ se aplicó regresión lineal, usando el método de mínimos cuadrados. Este proceso permite determinar la ecuación de la recta que mejor se ajusta al diagrama de dispersión de puntos $\left(\log\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right), \log(N(\epsilon_1))\right), \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right), log(N(\epsilon_2))\right), \cdots, \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_N}\right), log(N(\epsilon_N))\right)$, los valores de $N(\epsilon)$ y ϵ son determinados de la base de datos que se obtiene de la aplicación del método de Box-Counting mediante ImageJ y el pluging FracLac. La pendiente de la recta, esto es, recta que mejor se ajusta es la dimensión fractal de la imagen en cuestión, véase Figura 10 a'), b') y c').

3. Resultados y discusión.

3.1. Descripción de los afloramientos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Afloramiento 1 (Macizo Rocoso α): Está conformado por rocas caliza, intemperizada, de color gris con tonalidades claras. Como características del macizo se denota karstificación dada por el efecto de agua meteórica sobre la roca carbonatada, con formación incipiente de la morfología cárstica lapiez (Martínez-Villarreal, 2018). También se observa superficies estilolíticas paralelas a la estratificación, indicando que la roca fue afectada por procesos de disolución bajo presión litostática durante la diagénesis (Hancock, 1985). Además, de estas estructuras se observan familias de diaclasas sin relleno, muy espaciadas, formadas presumiblemente por esfuerzos tensionales vinculados al plegamiento (Martínez-Villarreal, 2018), véase Figura 13.

Figura 13. Roca caliza poco fracturada correspondiente al Macizo Rocoso α.

Afloramiento 2 (Macizo Rocoso β): Se conforma también por roca caliza intemperizada, de color gris claro y tonalidades de gris más oscuro; además se observa coloración de un tono naranja debido a la oxidación por meteorización química (Martínez-Villarreal, 2018). Como características del macizo se muestra karstificación al igual que el caso anterior. Además de estas estructuras, se observan familias de diaclasas rellenas de calcita en distintas direcciones, con menor espaciamiento entre ellas, igualmente formadas por esfuerzos tensionales vinculados al plegamiento (Hancock, 1985; Martínez-Villarreal, 2018), véase Figura 14.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Figura 14. Roca caliza medianamente fracturada correspondiente al Macizo Rocoso β.

Afloramiento 3 (Macizo Rocoso *δ*): se conforma, como en los casos anteriores, por roca caliza, intemperizada, en color gris con tonalidades claras y tonalidades de un gris más oscuras; también presenta zonas de coloración naranja vinculadas a oxidación por meteorización química. También se observan morfologías kársticas con formación incipiente de lapiez (Martínez-Villarreal, 2018). Además, de estas estructuras se observan dos familias de diaclasas rellenas de calcita, con menor espaciamiento, formadas durante el plegamiento laramídico. Además, se observa menor espesor de los estratos, variando entre 10 a 30 cm. A diferencia de los macizos anteriores este presenta una mayor cantidad discontinuidades dadas por la intersección de las superficies de estratificación y las diaclasas, véase Figura 15.

Figura 15. Roca caliza muy fracturada correspondiente al Macizo Rocoso δ.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

3.2. Determinación de la Dimensión fractal DF.

Las Figuras 16, 17 y 18 son algunos ejemplos de resultados obtenidos al aplicar el método de *Box-Counting* (conteo de cajas) usando el pluging FracLac, este software también es usado en (Caicedo-Ortiz y col., 2017). Las Figuras 16 (a), 17 (a) y 18 (a) presentan la relación que existe entre el tamaño de caja y el número de cajas, mediante un diagrama de dispersión de puntos $(\epsilon_1, N(\epsilon_1)), (\epsilon_2, N(\epsilon_2)), \cdots, (\epsilon_N, N(\epsilon_N))$, en el cual se observa inmediatamente que a medida que el tamaño de la caja o la celda disminuye, el número de cajas aumenta. Las Figuras 16 (b), 17 (b) y 18 (b) presentan el diagrama de dispersión de la relación lineal de los puntos $\left(\log\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right), \log(N(\epsilon_1))\right), \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right), log(N(\epsilon_2))\right), \cdots, \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_N}\right), log(N(\epsilon_N))\right)$ y la recta que mejor se ajusta por el método de mínimo cuadrados. En las Figuras 16 (b), 17 (b) y 18 (b) se puede observar inmediatamente la relación que se tiene y el grado de correlación, estudios muy parecidos se hacen en (González y col., 2019). La pendiente de la recta nos aproxima a la dimensión fractal. Este método también es aplicado en (Millado y Ivanissevich, 2017; Hernández y col., 2021).

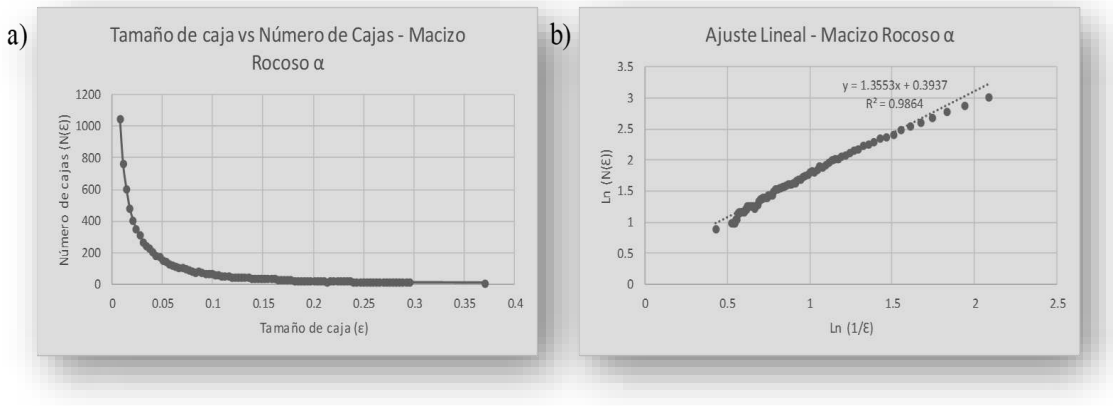


Figura 16. a) Relación entre los puntos $(\epsilon_1, N(\epsilon_1)), (\epsilon_2, N(\epsilon_2)), \cdots, (\epsilon_N, N(\epsilon_N))$. b) diagrama de dispersión de $\left(\log\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right), \log(N(\epsilon_1))\right), \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right), log(N(\epsilon_2))\right), \cdots, \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_N}\right), log(N(\epsilon_N))\right)$ y su respectiva recta de ajuste, para una de las 20 diferentes posiciones de la cuadrícula sobre la imagen Macizo Rocoso α.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

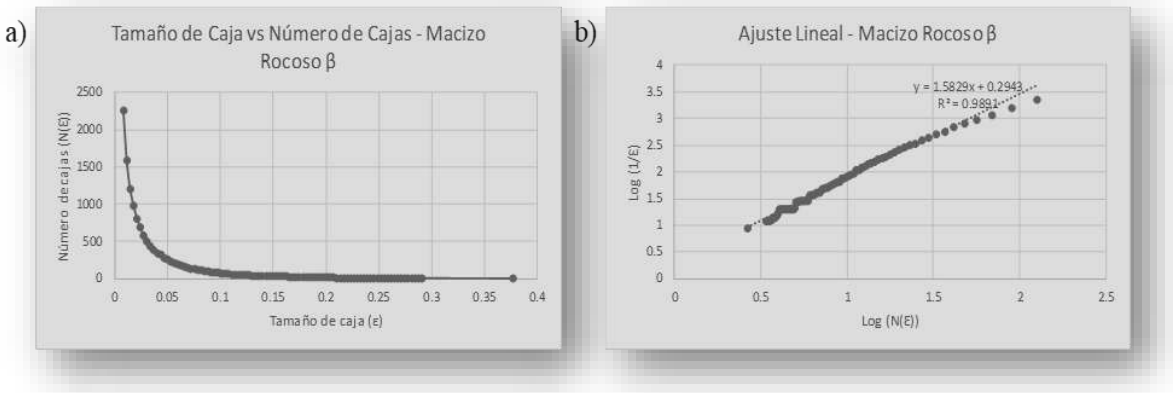


Figura 17. a) Relación entre los puntos $(\epsilon_1, N(\epsilon_1)), (\epsilon_2, N(\epsilon_2)), \cdots, (\epsilon_N, N(\epsilon_N))$. b) diagrama de dispersión de $\left(\log\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right), \log(N(\epsilon_1))\right), \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right), log(N(\epsilon_2))\right), \cdots, \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_N}\right), log(N(\epsilon_N))\right)$ y su respectiva recta de ajuste, para una de las 20 diferentes posiciones de la cuadrícula sobre la imagen Macizo Rocoso β.

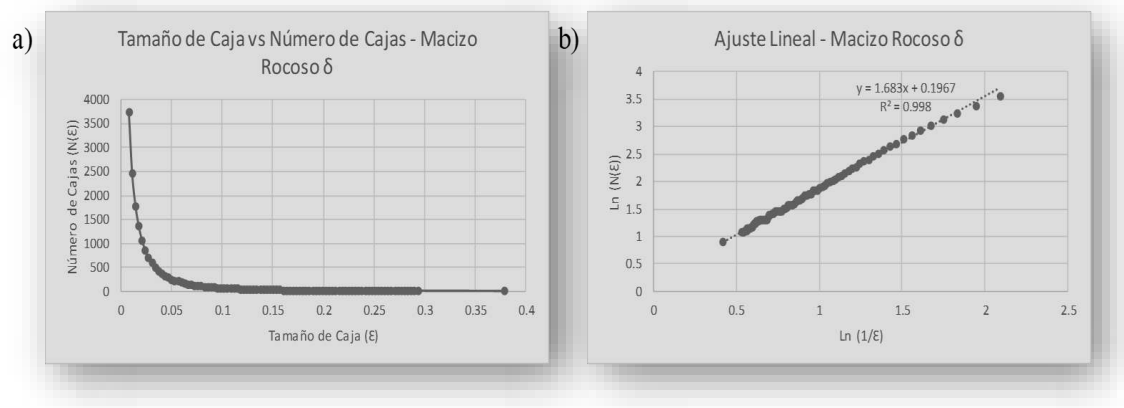


Figura 18. a) Relación entre los puntos $(\epsilon_1, N(\epsilon_1)), (\epsilon_2, N(\epsilon_2)), \cdots, (\epsilon_N, N(\epsilon_N))$. b) diagrama de dispersión de $\left(\log\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right), \log(N(\epsilon_1))\right), \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right), log(N(\epsilon_2))\right), \cdots, \left(log\left(\frac{1}{\epsilon_N}\right), log(N(\epsilon_N))\right)$ y su respectiva recta de ajuste, para una de las 20 diferentes posiciones de la cuadrícula sobre la imagen Macizo Rocoso δ.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

El valor de la pendiente de la recta ajustada, en este caso 1.3553, 1.5829 y 1.683, dan la dimensión fractal única (con correlaciones 0.9864, 0.9891 y 0.998) de los Macizos Rocosos α, β y δ respectivamente para alguna posición de la cuadrícula en la imagen. En este caso, se observa una diferencia notable entre la dimensión fractal de las tres imágenes estudiadas, teniendo así, una mayor (intensa) irregularidad o fractalidad en el Macizo Rocoso δ, seguida por el Macizo Rocoso β con una fractalidad media y finalmente el Macizo Rocoso α con una baja fractalidad o fragmentación. En la Tabla 1 se presentan los resultados de los diferentes valores de la dimensión fractal para 20 diferentes posiciones de la cuadricula o mallado sobre la imagen, acompañadas de su respectivo factor de correlación r^2, media, varianza y desviación estándar.

Tabla 1. Dimensión fractal de macizos rocosos α, β y δ para 20 diferentes posiciones de la cuadrícula.

Macizo Rocoso α				Macizo Rocoso β				Macizo Rocoso δ			
Df	r^2	varianza	σ	Df	r^2	varianza	σ	Df	r^2	varianza	σ
1.36	0.98			1.58	0.98			1.68	0.99		
1.32	0.98			1.57	0.98			1.70	0.99		
1.36	0.98			1.57	0.98			1.69	0.99		
1.33	0.99			1.58	0.98			1.68	0.99		
1.28	0.98			1.50	0.99			1.64	0.99		
1.28	0.98			1.51	0.99			1.64	0.99		
1.27	0.99			1.50	0.99			1.63	0.99		
1.28	0.99			1.49	0.99			1.63	0.99		
1.28	0.99			1.50	0.99			1.64	0.99		
1.29	0.98			1.51	0.99			1.64	0.99		
1.29	0.98	0.0006	0.024	1.50	0.99	0.001	0.03	1.64	0.99	0.0004	0.02
1.27	0.99			1.49	0.99			1.63	0.99		

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

1.29	0.98			1.51	0.99			1.64	0.99		
1.28	0.98			1.50	0.99			1.64	0.99		
1.29	0.98			1.50	0.99			1.63	0.99		
1.28	0.98			1.50	0.99			1.64	0.99		
1.28	0.99			1.51	0.99			1.64	0.99		
1.27	0.99			1.50	0.99			1.63	0.99		
1.27	0.99			1.50	0.99			1.64	0.99		
1.28	0.99			1.50	0.99			1.64	0.99		
$\overline{Df}$	1.29			$\overline{Df}$	1.51			$\overline{Df}$	1.64		
$\overline{r^2}$	0.98			$\overline{r^2}$	0.98			$\overline{r^2}$	0.99		

En la Figura 19 tenemos que A), B) y C) muestran la distribución de dimensiones fractales para cada una de las imágenes de los Macizos Rocosos α, β y δ respectivamente.

Para el caso Macizo Rocoso α, el 80% de las dimensiones fractales están en el intervalo [1.27, 1.29], lo cual equivale a 16 elementos dentro de ese intervalo y únicamente el 20% de las dimensiones fractales están en los intervalos (1.31, 1.33] y (1.35, 1.37) "10% en cada intervalo", esto es, 2 y 2 elementos respectivamente. Cabe señalar que el grosor de las dimensiones fractales

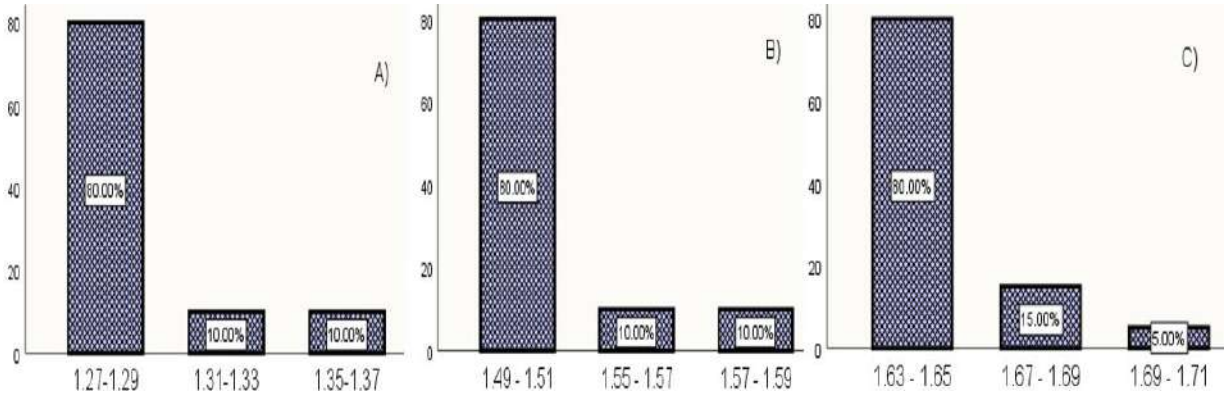


Figura 19. Porcentaje de distribución de las dimensiones fractales de los Macizos Rocosos α, β y δ, tomadas de la Sierra Santa Rosa.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

"porcentaje acumulado" están en el intervalo [1.27, 1.33], teniendo en dicho intervalo el 90% de ellas. Por otro lado, claramente se puede observar en la Figura 19 A una distribución asimétrica a la derecha, que se corrobora con los valores de la media, mediana y modo; la media es 1.2925, la mediana es 1.28 y la moda coincide con la mediana. El valor de la varianza y la desviación estándar es muy pequeño, por la Tabla 1 (Macizo Rocos α), lo cual nos indica que hay poca variabilidad de las dimensiones fractales respecto de la media (la mayoría de las dimensiones fractales están muy cerca de la media). Finalmente, la tendencia que se observa en la Figura 19 A, es característica de la distribución log-normal, lo cual tiene sentido, ya que para determinar la dimensión fractal aplicamos logaritmos a los valores de número de cajas $N(\varepsilon)$ y tamaño de caja o celda $\frac{1}{\varepsilon}$.

Del mismo modo en la Figura 19 B "caso Macizo Rocoso β", el 80% de las dimensiones fractales se encuentran en el intervalo [1.49, 1.51], es decir, existen 16 elementos dentro de dicho intervalo y únicamente el 20% de las dimensiones están en los intervalos [1.55, 1.57] y [1.57, 1.59] "10% en cada intervalo", es decir, 2 y 2 elementos respectivamente. Debemos mencionar que el grosor de las dimensiones fractales "porcentaje acumulado" están en el intervalo [1.49, 1.57], teniendo en este intervalo el 90% de ellas. Por otro lado, y lo mismo que en el caso anterior, se puede observar claramente en la Figura 19 B una tendencia asimétrica a la derecha, que se corrobora con los valores de la media, mediana y moda; la media es 1.5160, la mediana es 1.5 y la moda coincide con la mediana. El valor de la varianza y la desviación estándar es muy pequeño, por la Tabla 1 (Macizo Rocoso β), lo cual nos indica que hay poca variabilidad en las dimensiones fractales respecto de la media (la mayoría de las dimensiones fractales están muy cerca de la media). Al igual que el caso anterior, la tendencia que se observa en la Figura 19 B tiende a ser algo muy característico de la distribución log-normal, lo cual tiene sentido, ya que para determinar la dimensión fractal aplicamos logaritmos a los valores de número de cajas $N(\varepsilon)$ y tamaño de caja o celda $\frac{1}{\varepsilon}$.

Finalmente, el caso del Macizo Rocoso δ: según la Figura 19 C, el 80% de las dimensiones fractales están en el intervalo [1.63, 1.65], en otras palabras, igualmente existen 16

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

mediciones dentro de dicho intervalo y únicamente el 20% de las dimensiones fractales están en los intervalos [1.67, 1.69] y [1.69, 1.71] "10% en cada intervalo", es decir, 2 y 2 elementos respectivamente. Debemos mencionar que la mayoría de las dimensiones fractales "porcentaje acumulado" están en el intervalo [1.63, 1.69] en este caso, teniendo en este intervalo el 90% de ellas. También, se puede observar al igual que en el caso del Macizo Rocoso α y β una tendencia asimétrica a la derecha, y que se corrobora con los valores de la media, mediana y moda; la media es 1.6470, la mediana es 1.64 y la moda coincide con el valor de la mediana. El valor de la varianza y la desviación estándar es muy pequeño, por la Tabla 1 (Macizo Rocoso δ), lo que indica que hay poca variabilidad en las dimensiones fractales respecto de la media (la mayoría de las dimensiones fractales están muy cerca de la media) igual que en los dos casos anteriores. De igual forma, la tendencia observada en la Figura 19 C, tiende a ser característico de la distribución log-normal.

Por lo mencionado anteriormente, se tienen valores de correlaciones bastante aceptables de acuerdo con el método de mínimos cuadrados. Para el cálculo de la dimensión fractal, para una de las 20 diferentes posiciones de la cuadrícula sobre cada una de las imágenes de los macizos rocosos.

Por otro lado, los resultados expuestos en el epígrafe anterior, el Macizo Rocoso α es el que presenta el menor valor de DF de 1.2925, observar la Tabla 1 y la Figura 19 A; desde el punto de vista geológico, este macizo presenta una menor cantidad o densidad de discontinuidades condicionado por un mayor espesor de los estratos, caracterizado por estratificación masiva con espesores mayores a un metro. Además, los sistemas de diaclasas están muy espaciados a más de 50 centímetros entre superficies de una misma familia. Estas características le confieren al macizo una estructura en bloques de grandes dimensiones, por la intersección de los planos de estratificación y los de las diaclasas. Por lo antes dicho, el valor de la dimensión fractal antes indicada se vincula a un macizo rocoso con baja intensidad de fracturamiento (Sui y col., 2022).

El Macizo Rocoso β presenta el valor medio de DF de 1.5158; geológicamente este macizo presenta un punto intermedio de cantidad o densidad de discontinuidades debido a un menor

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

espesor en los estratos; el espesor de las capas se encuentra en el rango de 40-50 centímetros. Además de esto, los sistemas de diaclasas no presentan mucho espaciamiento, se disponen aproximadamente a 40 centímetros de distancia de una misma familia. Por lo antes dicho, el valor de la dimensión fractal se vincula a un macizo rocoso con una mediana intensidad de fracturamiento.

El Macizo Rocoso δ es el que presenta el mayor valor de DF de 1.6477; geológicamente este macizo presenta una mayor densidad de discontinuidades dado por un menor espesor de los estratos, caracterizado por estratificación de media a fina con espesores de 10 a 30 centímetros. Además, se observan familias de diaclasas rellenas de calcita, con menor espaciamiento, formadas tectónicamente, vinculadas a las deformaciones que afectaron la región (e.g. orogenia Laramide). Este tectonismo condiciona valores de espaciamiento de las diaclasas de 20 centímetros, lo que contribuye a un aumento en la intensidad del fracturamiento. Por lo anterior, el valor de la dimensión fractal se vincula a un macizo rocoso intensamente fracturado (Sui y col., 2022).

Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Sui y col. (2022), donde se calculan la DF para tres modelos de fracturas aplicando el método de conteo de cajas y el método simple y comparan los resultados. En dicho trabajo los autores obtienen valores de DF mayores (1.852) en el modelo de mayor fracturamiento, y valores menores de DF (1.498), donde el modelo tiene menor densidad de fracturas. Esta misma tendencia sucede con los resultados obtenidos en esta investigación, donde el macizo Rocoso δ presenta el valor mayor de DF (1.6477), caracterizado por mayor intensidad de fracturas, menor espaciamiento y espesor de los estratos; esto condiciona una respuesta más frágil de los estratos que lo conforman. Por otro lado, el Macizo Rocoso α que presenta el menor valor de DF (1.2925) en respuesta a estratos más potentes que le confieren mayor resistencia frente a los esfuerzos tectónicos, condicionando una menor densidad de fracturas.

El análisis y cuantificación de patrones en los sistemas de fracturas, tal como sucede con los valores de DF para los tres macizos rocosos analizados con diferentes intensidades de fracturamiento, pueden aportar resultados valiosos en distinguir los factores que controlan la

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

evolución del fracturamiento durante un proceso geológico deformacional, y de su distribución espacial de los sistemas de fracturas (Riley y col., 2011; Tongjun y col., 2015). En rocas estratificadas tales como las calizas que conforman los tres macizos rocos estudiados, la cuantificación del DF indica una relación entre el espaciamiento de las fracturas y el espesor de los estratos, donde dicho espesor juega un papel crítico en el espaciamiento de las fracturas y, por ende, en la intensidad del fracturamiento. Resultados semejantes lo hallamos en el trabajo de Riley y col. (2011), quienes realizan una cuantificación de dimensión fractal de redes de fracturas en rocas masivas sin estratificación, utilizando conjuntos de datos sintéticos y naturales.

En la literatura científica se identifican otras aplicaciones de los fractales en las geociencias, tal es el caso de estudios dirigidos a distinguir diferentes sistemas de fracturas (Gillespie y col., 1993), otros para identificar el ambiente depositacional de sedimentos (Hecht, 2000), o identificar fracturas tensionales de fracturas de cizallas (Blenkinsop y Fernandes, 2000). En la investigación que se presenta se logra calcular la DF y su relación con la intensidad de fracturamiento de macizos rocosos carbonatados.

4. CONCLUSIONES

El uso de la geometría fractal empleando el método de *Box-Counting*, permitió cuantificar la dimensión fractal de los Macizos Rocosos α, β y δ de la Sierra de Santa Rosa; con base a los valores obtenidos, el Macizo Rocoso α presenta una dimensión fractal menor, de 1.2924 debido a que presenta una menor cantidad de discontinuidades, condicionado por un mayor espesor en los estratos, y por tanto una estratificación masiva; el Macizo Rocoso β tiene dimensión fractal media, de 1.5158, debido a que presenta pocas discontinuidades, esto último por un menor espesor en los estratos y los sistemas de diaclasas no presentan mucho espaciamiento; y el Macizo Rocoso δ con una dimensión fractal mayor, de 1.6477, debido a que el macizo tiene una mayor cantidad de discontinuidades por un menor espesor en los estratos y manifestar familias de diaclasas rellenas de calcitas con un espaciamiento menor.

El cálculo de las fractalidades o dimensiones fractales de los Macizos Rocosos α, β y δ, a través de la aplicación de la geometría fractal y el método de Box-Counting para la

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

aproximación de éstas, amplía el campo de estudio dentro del área de las Ciencias de la Tierra, en cuanto a investigaciones teórico-experimentales en la región del estado de Coahuila. El método de Box-Counting es una de las herramientas más fuertes y ampliamente usadas para la aproximación de la dimensión fractal de sistemas complejos con fractalidad o irregularidad, y puesto de manifiesto en particular para las imágenes aquí estudiadas. Por otro lado, el método de Box-Counting tiene una amplia gama de aplicabilidad en diferentes áreas por decir algunas: caracterización de yacimientos de petróleo, mineralizaciones, fracturamiento en diferentes metales, análisis cartográfico de variación espacio temporal, y caracterización de tamaños de partícula en suelos, este último, muy importante dentro del procesamiento de minerales.

La dimensión fractal como herramienta de caracterización, no se puede considerar como una ecuación del todo, sin embargo, según los resultados expuestos en este trabajo de investigación, confirma que la dimensión fractal es una herramienta importante para analizar y describir sistemas complejos como macizos rocosos, que permite clasificar, estudiar, analizar y caracterizar dichos sistemas.

5. REFERENCIAS

Ake, F. (2011). Fractal vein distributions within a fault-fracture mesh in an exhumed accretionary mélange, Chrystalls Beach Complex, New Zealand. *Journal of Structural Geology*. 33: 918-927.

Alfaro, M., Murillo, M. & Soto, A. (2010). *Fractales*. (Primera edición). Costa Rica: Ed. Revista digital matemática educación e internet. 87 Pp.

Angeles, G., Perillo, G., Piccolo, M. & Pierini, J. (2004). Fractal analysis of tidal channels in the Bahía Blanca Estuary. *Geomorphology*. 57: 263–274.

Ascencio, F. & Posadas, R. (2018). Difusión anómala en yacimientos naturalmente fracturados con naturaleza fractal. *Ingeniería petrolera*. 58: 211-234.

Atencia, V. (2014). *Fractales matemáticos* [Tesis de grado, Universidad de Barcelona]. http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/54228/1/memoria.pdf

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Barnsley, M. (1993). *Fractals everywhere*. (Second edition). U.S.A.: Elsevier Inc., Morgan Kaufmann Pub. 531 Pp.

Barton, C. & La Pointe, P. (1995). *Fractals in Earth Sciences*. (First edition). U.S.A.: New York Plenum Press. 265 Pp.

Besicovitch, A. (1929). On linear sets of points of fractional dimension. *Mathematische Annale*. 101: 161-193.

Blenkinsop, T. & Fernandes, T. (2000). Fractal characterization of particle size distributions in chromitites from the Great Dyke, Zimbabwe. *Pure appl. Geophys*. 157: 505–521.

Caicedo-Ortiz, H., Castañeda, H. & Santiago-Cortés, E. (2017). Fractalidad en regiones de Formación Estelar. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 39: 1-8.

Cello, G. (1997). Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*. 19: 945-953.

Cruz, J. (2017). *Ejemplos de fractales en los conjuntos de Julia de funciones meromorfas* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. https://www.fcfm.buap.mx/assets/docs/docencia/tesis/matematicas/JoseCruzRodriguez.pdf

Davarpana, A. & Babaie, H. (2013). Anisotropy of fractal dimension of normal faults in northern Rocky Mountains: Implications for the kinematics of Cenozoic extension and Yellowstone hotspot's thermal expansión. *Tectonophysics*. 608: 530–544.

Domínguez, P. & Sienra, G. (2002). A study of the dynamics of $f_\lambda(z) = \lambda Sen(z)$. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 12: 2869-2883.

Dubois, J. (1995). *La dinamique non linéare en physique du globe*. Francia: Elsevier / Masson. 265 Pp.

Falconer, K. (2003). *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications*. (Second edition). England: John Wiley & Sons, Ltd. 337 Pp.

Fatou, P. (1920). Sur les équations fonctionnelles. *Bulletin de la Société Mathématique de France*. 48: 33-94. DOI: 10.24033/bsmf.1003.

Fatou, P. (1926). Sur l'itération des finctions transcendantes entières. *Bulletin de la Société Mathématique de France.* 47: 337-3370. DOI: 10.1007/BF02559517.

Filgueira, R., García, M., Roggiero, M., Aragón, A. & Sarli, G. (2002). Uso del modelo fractal para caracterizar la distribución de tamaño de partículas en suelos. *Ciencia del Suelo.* 20 (2): 114-117.

García, G., Mora, G. & Redtwitz, D. (2017). Box-Counting dimension computed by α-dense curves. *Fractals.* 25 (05): 1750039-1- 1750039-11. DOI: 10.1142/s0218348x17500396.

Gaston, J. (1978). Mémoire sur l'iteration des applications fonctionnelles. *J. Math. Pures et Appl*. 8: 47-245.

Gillespie, P., Howard, C., Walsh, J. & Watterson, J. (1993). Measurement and characterisation of spatial distributions of fractures. *Tectonophysics.* 226: 113–141.

Gleick, J. (2008). *Chaos. Making a New Science*. U.S.A.: Penguin. 384 Pp.

González, H., Argüeyes, L. & Álvarez, M. (2019). Análisis cartográfico de la dimensión fractal para la variación espacio temporal de ríos. *Revista Geoespacial.* 16 (1): 78-97.

González, F., Puente, R., González, E. & Camprubí, A. (2007). Estratigrafía del Noreste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 59 (1): 43-62.

Gumiel, P. & Arias, M. (2005). Introducción a los fractales: una nueva forma de analizar la geometría y cuantificar los procesos geológicos. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Secc. Geo.).* 100 (1-4): 115-127.

Gutiérrez, J. (1998). Sistemas no lineales. Conceptos, algoritmos y aplicaciones. *CCBol. 98*: 1-28.

Hancock, P. (1985). Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology.* 7 (3-4): 437-457.

Hausdorff, F. (1919). Der Wertvorrat einer Bilinearform. *Mathematische Zeitschrift.* 3: 314-316.

Hecht, C. (2000). Appolonian packing and fractal shape of grains improving geomechanical properties in engineering geology. *Pure and Applied Geophysics*. 157 (4): 487–504.

Hernández, A., Almaguer, Y., Díaz, R., Lira, K., López, F. & Valdés, A. (2021). Dimensión fractal de las redes de drenaje superficial de las Sierras de Obayos y Santa Rosa, Coahuila. *Ciencia Cierta*. 67: 146-169.

Hurst, H. (1957). Un modelo estadístico sugerido de algunas series temporales que ocurren en la naturaleza. *Ciencia del Suelo. 20 (2)*: 180 – 494.

Karcz, Z. & Scholz, C. (2003). The fractal geometry of some stylolites from the Calcare Massiccio Formation, Italy. *Journal of Structural Geology*. 25: 1301–1316.

Karperien, A. (2013). FracLac for ImageJ. US National Institutes of Health [en línea]. Disponible en: https://imagej.nih.gov/ij/plugins/fraclac/FLHelp/Introduction.htm. Fecha de consulta: 8 de agosto de 2022.

Leal, J. (2013). *Identificación y modelado de fracturas naturales en pozos de un yacimiento de hidrocarburos ubicado en la cuenca de Catatumbo, departamento norte de Santander-Colombia, utilizando registros de imágenes resistivas y datos de dimensión fractal* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21849/01194782.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lisi, B., Honglin, H., Zhanyu, W. & Feng, S. (2012). Fractal properties of landforms in the Ordos Block and surrounding areas, China. *Geomorphology*. 175–176: 151–162.

Loehle, C. (1994). Rescaled box counting for the topological analysis of spatial data. [en línea]. Disponible en: https://www.osti.gov/biblio/10142283. DOI:10.2172/10142283.

López, M. & Jurado, P. (2011). Análisis preliminar del cálculo de la dimensión fractal de diferentes tipos de costa en el litoral andaluz. *Geo-temas.* 15: 113-116.

Mandelbrot, B. (1967). How Long is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *En Science, new series*. 156: 636-638.

Mandelbrot, B. (1975). *Les objets fractals. Forme, hasard et dimension*. (Quatrième èdition). France: Flammarion. 175 Pp.

Mandelbrot, B. (1982). *Fractal Geometry of Nature*. U.S.A.: W. H. Freeman and Company. 470 Pp.

Mandelbrot, B. (1997). *La geometría fractal de la naturaleza*. (Primera edición). España: Metatemas 49. 662 Pp.

Martínez, F., Ojeda, A. & Manriquez, H. (2020). Morfometría y dimensión fractal en redes de drenaje de cuencas de Chile, *ResearchGate. 133*: 27-41.

Martínez-Villarreal, A. (2018). *Estudio Tectónico De Cizallas En La Región Central Del Anticlinal Obayos*. Escuela superior de Ingeniería "Adolfo López Mateos", Universidad Autónoma de Coahuila, México.

Medina-Martínez, J. F. (2021). *Análisis estructural a escala de afloramiento de la sierra de Obayos, Coahuila* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de Coahuila.

Millado, P. & Ivanissevich., M. (2017). Dimensión fractal y mamografía; un estudio local. Río Gallegos, Pcia. De Santa Cruz. *ICT-UNPA*. ISSN: 1852-4516: 134-149.

Miranda, Ma., Oleschko, K., Francois, J., Castrejon, F., Taud, H. & Brambila, F. (2006). Porosidad de los yacimientos naturalmente fracturados: una clasificación fractal. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 23: 199-214.

Moná, J. E., Echeverri, R., & Brasil, A. (2019). *Aplicación de la teoría fractal para la estimación de la distribución geométrica de fallas en macizos rocosos* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77499?show=full

Munkres, J. (2002). *Topología*. (Segunda edición). España: Prentice Hall, Inc. 607 Pp.

Pelletier, J. (2007). Fractal behavior in space and time in a simplified model of fluvial landform evolution. *Geomorphology*. 91: 291-301. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.015.

PEMEX, Petróleos Mexicanos, (1988). Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico. México, D.F., Subdirección de producción primaria, Coordinación ejecutiva de exploración, Petróleos Mexicanos, Informe Inédito. 229 Pp.

Pérez-López, R., Paredes C. & Muñoz-Martín, A. (2005). Relationship between the fractal dimension anisotropy of the spatial faults distribution and the paleostress fields on a Variscan granitic massif (Central Spain): The F-parameter. *Journal of Structural Geology*. 27: 663–677. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.01.002.

Ramírez-Hernández, R. & Cáceres-Govea, D. (2017). Comportamiento autoafín en redes de drenaje controladas estructuralmente. Caso de estudio río San Cristóbal, Pinar del Río. *Minería y geología.* 33: 279-292.

Ramírez-Hernández, R., Rodríguez-Infante, A., & Ordaz-Hernández, A. (2017). Dimensión fractal en redes de drenaje controladas estructuralmente en cuencas hidrográficas de Pinar del Río, Cuba. *Minería y geología.* 33: 36-49.

Ramírez, P. & Alejano, M. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes. Madrid, España en *Red Desir*. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf. Fecha de consulta: 10 de enero de 2022.

Riley, P., Tikoff, B. & Murray, A.B. (2011). Quantification of fracture networks in non-layered, massive rock using synthetic and natural data sets. *Tectonophysics.* 505(1-4): 44–56. DOI:10.1016/j.tecto.2011.04.002.

Robinson, J. C. (2011). *Dimensions, Embeddings, and Attractors*. (First edition). U.S.A.: Cambridge University Press. 219 Pp.

Rodríguez, J., Prieto, S., Polo, F., Correa, C., Soracipa, Y., Blanco, V. & Camilo, A. (2014). Fractal and euclidian geometrical differentiation of normal and restenosed arteries: arterial mathematical harmony. *Repert. med. cir*. 23 (2): 139-144.

Rubiano, G. (2009). *Iteración y fractales con Mathematica*. (Primera edición). Colombia: Ed. Universidad Nacional de Colombia. 264 Pp.

Sabogal, S. & Arenas, G. (2011). Una introducción a la geometría fractal. [En línea]. Disponible en: http://matematicas.uis.edu.co/libros/l_geofrac.pdf. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022.

Salazar, L., D. (2018). Apuntes de geología estructural con ejercicios. [En línea]. Disponible en https://www.studocu.com/cl/document/universidad-nacional-andres-bello/geologia-estructural-y-analisis-numerico-de-esfuerzos-y-deformaciones/material-didactico/8603882. Fecha de consulta: 4 de mayo de 2022.

SGM, Servicio Geológico Mexicano, (2003). Carta geológico-minera de Melchor Múzquiz (G14-A12), Coahuila, a escala 1:50 000. 1 Pp.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 29 de noviembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

SGM, Servicio Geológico Mexicano, (2021). Formación Aurora, Léxico Estratigráfico de México. Fuente: https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2021.

Shen, X., H., Zou, L., J., Zhangb, G., F., Su, N., Wu, W., Y. & Yang, S., F. (2011). Fractal characteristics of the main channel of Yellow River and its relation to regional tectonic evolution. *Geomorphology*. 127: 64-70.

Sui, L., Yuan, W., Wu., Jinsui, Zhang, J., Yu, J., Ma, X. & Sun, Q. (2022). Fractal Description of Rock Fracture Networks Based on the Space Syntax Metric. *Fractal Fract*. 6. 353: 1-14.

Talanquer, V. (2011). *Fractus, fracta, fractal, fractales de laberintos y espejos*. México: Ed. Fondo de cultura económica. 114 Pp.

Tongjun, M., Boming, Y., Yonggang, D. & Quantang, F. (2015). A fractal analysis of permeability for fractured rocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 81: 75–80.

Toro, K. J., Murcia, L. F. & Domínguez, D. (2007). Cálculo de la Dimension Fractal de la Falla Geológica del sur Occidente de Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 17-1: 35-46.

Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. New York, Cambridge University Press. 965 Pp.

Vásquez-Serrano, A. (2013). Análisis fractal de fracturas geológicas en un análogo expuesto de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados y su aplicación en modelos de flujo de fluidos [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://www.researchgate.net/publication/315643754_Analisis_fractal_de_fracturas_geologicas_en_un_analogo_expuesto_de_yacimientos_carbonatados_naturalmente_fracturados_y_su_aplicacion_en_modelos_de_flujo_de_fluidos

Volland, S. & Kruhl, J. (2004). Anisotropy quantification: The application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW Sardinia. *Journal of Structural Geology*. 26: 1499-1510.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Biocarbon: una revisión de literatura sobre sus propiedades, métodos de caracterización y aplicaciones

Biochar: a review on the properties, characterization methods and applications.

Ing. Norma Araceli Guel-Najar [1], Dr. Jorge Carlos Ríos-Hurtado[1*], Dra. Aurora Margarita Pat-Espadas[2], M.C. Juanita Yazmin Guevara-Chávez[1], M.C. Fatima Pamela Lara-Castillo[1]

[1]Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila
Carretera 57 Km. 5 Estancias de San Juan Bautista Monclova, Coahuila, México, C.P. 25718.
[2]Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM
Luis Donaldo Colosio s/n esquina Madrid, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83200
Correo electrónico: jorgerios@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

El Dr. Jorge Carlos Ríos Hurtado es especialista en el área de materiales para aplicaciones medioambientales y biomédicas. Ha desarrollado proyectos de investigación con materiales a base de carbono como carbón activado, telas de carbón activado y nanotubos de carbono, donde ha tenido proyectos financiados y ha dirigido estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado.

Resumen: El biocarbón es un material carbonoso el cuál se ha utilizado desde hace un largo tiempo, debido al aumento de graves problemas ambientales, así como el deterioro del suelo, por lo que sus aplicaciones varían, como la remediación del suelo, secuestro de carbono, remoción de contaminantes, producción de biocombustibles, mejoramiento de materiales de construcción, entre muchas otras. Se han realizado diversos estudios e investigaciones para mejorar las propiedades físicas y químicas del biocarbón, así como aumentar su rendimiento y eficacia, todo esto lográndolo a un bajo costo y que el biocarbón sea sustentable para futuras aplicaciones. En esta revisión se presentan la diversidad de materia prima y distintos métodos para la obtención del biocarbón, así como sus propiedades, la modificación, su caracterización y sus aplicaciones.

Palabras clave: biocarbón, problemas ambientales, caracterización, aplicaciones, propiedades.

Abstract: Biochar is a carbonaceous material that has been used for a long time, due to the increase of serious environmental problems, as well as soil deterioration, so the applications varied, such as soil remediation, carbon sequestration, pollutant removal, biofuel production, improvement of construction materials, among many others. Several studies and research have been carried out to improve the physical and chemical properties of biochar, as well as to increase its performance and efficiency, all of this achieved at a low cost and to make biochar sustainable for future applications. This review presents the diversity of raw materials and different methods for obtaining biochar, as well as its properties, modification, characterization, and applications.

Keywords: biochar, environmental issues, characterization, applications, properties.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

1. Introducción

Debido a los innumerables beneficios del biocarbón como material de fácil producción, bajo costo y amplia disponibilidad ha sido acreedor a una extensa variedad de investigaciones, principalmente para la remediación del suelo y de los contaminantes en el medio ambiente (Zhou y col., 2021), los cuales son provocados en gran medida por el aumento de la urbanización y la industrialización. Por estos motivos, se han buscado formas más eficientes y económicas para producirlo a partir de una gran variedad de materia prima, como madera, residuos agrícolas y residuos sólidos urbanos, así como diferentes métodos termoquímicos para su elaboración y condiciones, sin embargo para su uso en diversas aplicaciones cuenta con algunas limitaciones las cuales se pueden mejorar mediante modificación física y química (Fang y col., 2021), así como la generación de biocarbones compuestos (Shukla y col., 2021).

El biocarbón es un prometedor sustituto y una alternativa para el carbón activado debido a sus amplias propiedades como elevada área superficial, estructura porosa, diferentes tamaños de poro, fracciones no carbonizadas y diversos grupos funcionales en su superficie (Rajec y col., 2016). Estas propiedades lo hacen beneficioso para ser utilizado en gran diversidad de aplicaciones, para un mejor uso del biocarbón es necesario determinar sus propiedades físicas y químicas, ya que estas características controlan su interacción con otros materiales y determinan sus capacidades (Novak y Johnson, 2018).

De acuerdo a las propiedades del biocarbón se determinará la aplicación que se la dará a este, el biocarbón cuenta con una amplia variedad de aplicaciones y estudios relacionados a estas, entre las que se encuentra la remediación de suelos contaminados (Anae y col., 2021), tratamiento de aguas residuales (Cheng y col., 2021), mitigación de gases de efecto invernadero (Lefebvre y col., 2021), secuestro de carbono en el suelo (Xu y col., 2021), productividad de cultivos (Azeem y col., 2021), producción de biocombustibles (Velusamy

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

y col., 2021), en el sector de construcción (Maljaee y col., 2021), entre muchas otras aplicaciones.

Esta revisión tiene como objetivo brindar información sobre el proceso de producción del biocarbón, sus principales propiedades, los métodos de modificación, las diferentes técnicas de caracterización y la diversidad de aplicaciones para futuros trabajos de investigación.

2. Biocarbón

En la literatura se encuentran diferentes definiciones para el uso de la palabra biocarbón, la definición más utilizada es la establecida por la International Biochar Initiative (IBI) el cual lo define como "Un material sólido que se obtiene de la conversión termoquímica de biomasa en un entorno limitado de oxígeno" (IBI, 2013).

Existen algunos términos muy parecidos por lo que es esencial poder distinguir las diferencias entre carbón vegetal, carbón activado y biocarbón, en la Figura 1 se muestran las estructuras de los diferentes materiales. El carbón vegetal (CV) es un material sólido con alto contenido en carbono que se obtiene al carbonizar la biomasa (materia orgánica). Es un combustible que se utiliza principalmente para producir energía, como materia prima (carburo de calcio, cal, cemento, etc.), en la industria metalúrgica (actúa como endurecedor y separador en la fabricación del acero y aleaciones metálicas), como combustible (ej. uso doméstico y para gasógenos) y como aditivo o pigmento en la industria alimentaria (Díaz Batalla y col., 2010; Lee y col., 2019). El carbón activado (CA) es un carbón vegetal el cual ha sido activado ya sea mediante activación física o química. En la activación física se utilizan gases oxidantes (ej. H_2O, CO_2 o aire) y en la activación química se utilizan reactivos químicos (ej. KOH, K_2CO_3, H_3PO_4, etc.), esta activación se realiza para aumentar sus características y propiedades, por ejemplo; la formación de grupos funcionales (ej. -OH, -C=O-, -O-, $-NH_2$, -COOH, etc.), el área superficial y la microporosidad (Ahmad y col., 2014; Moreno y col., 2021). Entre sus principales aplicaciones se encuentra el tratamiento de agua contaminada, remoción de contaminantes en fase gaseosa, en procesos médicos como en el

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

tratamiento de intoxicaciones, de cáncer, inhibición bacteriana y eficiencia antimicrobiana, además de utilizarse como catalizadores y soportes de catalizadores (Jjagwe y col., 2021; Lewoyehu, 2021; Moreno y col., 2021).

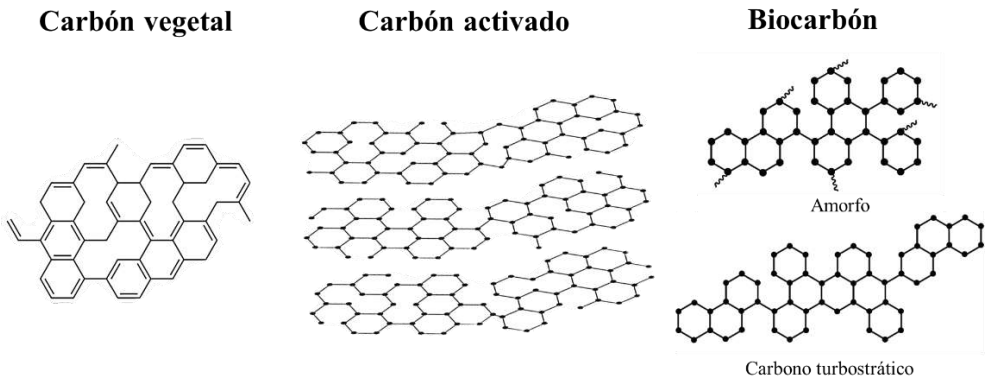


Figura 1. Comparación entre las estructuras del carbón vegetal, carbón activado y el biocarbón.

El biocarbón es un tipo de carbón vegetal y es muy similar al carbón activado en cuanto a su producción por pirólisis, pero a diferencia de este, el biocarbón no se carboniza completamente (≈95% de carbono y ≈5% de otros elementos), ya que el H y el O adicionales aún se encuentran presentes en su estructura, además el biocarbón no se trata con oxígeno y puede o no modificarse o activarse (Gope y Saha, 2021; Singh Yadav y col., 2023; Tareq y col., 2019). La parte no carbonizada (elementos inorgánicos o ceniza) puede interactuar con los diversos contaminantes del medio ambiente, sin embargo, estos elementos inorgánicos obstruyen los poros del biocarbón, disminuyendo el área superficial y la eficiencia de adsorción. Por otra parte un biocarbón con alto contenido de ceniza se puede emplear como catalizador (Gope y Saha, 2021; Li y col., 2023).

Las características y propiedades del biocarbón dependen principalmente del tipo de materia o biomasa utilizada, el método de producción, la temperatura y el tiempo de residencia (Gope y Saha, 2021; Tareq y col., 2019). El biocarbón es un material orgánico rico en carbono que

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

se prepara al calentar la biomasa (derivados agrícolas, estiércol, lodos de aguas residuales, entre otros), este se ha utilizado para la remediación y mejora del suelo, secuestro de carbono, realización de compostas a partir de residuos sólidos orgánicos, descontaminación del agua, como catalizador y activador, materiales de electrodos y modificadores de electrodos (Wang y Wang, 2019).

Algunas de las características distintivas del biocarbón es su alta capacidad de adsorción, alta superficie específica, microporosidad y su capacidad de intercambio iónico (Oliveira y col., 2017).

3. Características y propiedades del biocarbón

El biocarbón es un producto sólido con alto contenido en carbón, de color negro, el cual no tiene una forma definida a temperaturas de ≈400 °C, mientras que a temperaturas de ≈800 °C presenta una estructura de carbono turbostrático (Escalante y col., 2016; Shanmugam y col., 2022). La materia prima (biomasa) y el tipo de proceso así como las condiciones (temperatura, tiempo de residencia, etc.) determinarán las características y propiedades fisicoquímicas del biocarbón (Bruckman y Pumpanen, 2019; Oliveira y col., 2017; Tang y col., 2013). Entre las principales propiedades del biocarbón se encuentra el área superficial, porosidad, pH, carga superficial y grupos funcionales, que se describirán a continuación.

3.1.Área superficial y porosidad

El biocarbón se compone de poros, los cuales se forman después del proceso de pirólisis debido al proceso de deshidratación y liberación de componentes volátiles. De acuerdo con la IUPAC (por sus siglas en inglés, International Union of Pure and Applied Chemistry) los poros se dividen conforme a su tamaño, estos son los microporos, mesoporos y macroporos, los cuales cuentan con tamaños de $d < 2$ nm, 2-50 nm ($2 \text{ nm} < d < 50 \text{ nm}$) y $d > 50$ nm respectivamente. En la Figura 2 se presenta una esquematización sobre el tamaño de poros.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

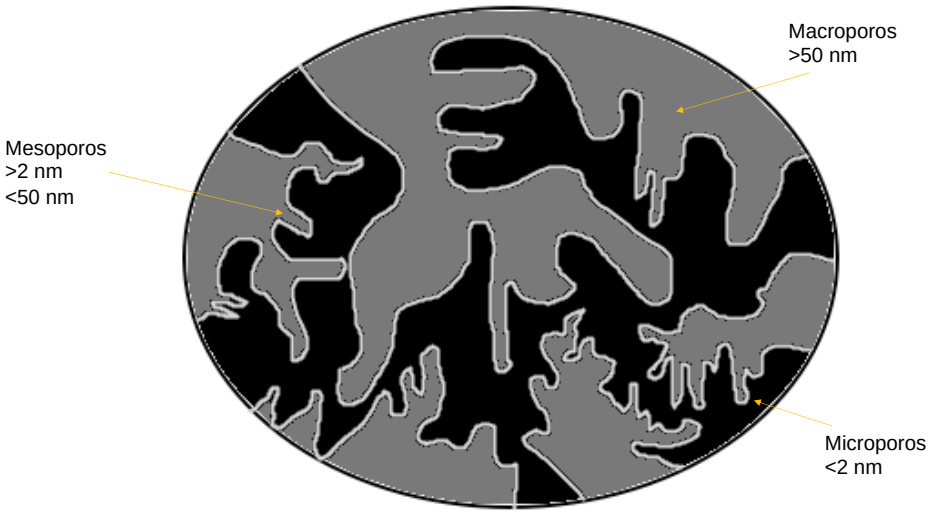


Figura 2. Esquematización de la porosidad de un biocarbón.

El área superficial del biocarbón se debe a su porosidad, entre más pequeño es el poro mayor será su área superficial (Ahmad y col., 2014; Leng y col., 2021). Al incrementar la temperatura de pirólisis, aumenta el área superficial y el volumen de poros del biocarbón, debido a que las altas temperaturas eliminan y agrietan las sustancias que bloquean los poros dando lugar a una superficie más extensa (Ahmad y col., 2014; Tomczyk y col., 2020). La descomposición de la materia prima orgánica (celulosa y lignina) también tiene un gran efecto en el área superficial, los macroporos se forman principalmente debido al contenido de lignina en la materia prima, mientras que los microporos se forman debido al contenido de celulosa (Steiner y col., 2016).

Los poros y el área superficial del biocarbón influyen grandemente en su capacidad de adsorción. El tamaño del poro es muy importante, ya que si el contaminante o lo que se desea adsorber (adsorbato) tiene un tamaño superior al poro, este no lo va a poder adsorber (Tareq y col., 2019).

3.2.pH

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Dependiendo la materia prima y la temperatura de pirólisis será el pH del biocarbón. La mayoría de biocarbones son alcalinos (pH>7) pero existen excepciones dependiendo la materia prima utilizada. La biomasa por lo general es ligeramente ácida o básica (generalmente con un pH de 5-7.5), al aumentar la temperatura en el proceso de pirólisis, se incrementa el contenido de ceniza y se desprenden los grupos funcionales ácidos (como carboxilo, formilo o hidroxilo), lo que aumenta el pH del biocarbón (Tareq y col., 2019; Weber y Quicker, 2018).

3.3.Carga superficial

La carga superficial del biocarbón depende en gran medida del valor del pH especialmente cuando se utiliza en soluciones acuosas, para la adsorción de iones inorgánicos. En un pH de 4-12 el biocarbón tiene cargas negativas, cuando se encuentra en condiciones acidas intensas el biocarbón mantiene cargas positivas. En el proceso de pirólisis, al aumentar la temperatura se desaparecen algunos grupos funcionales (grupo carboxilo, hidroxilo, etc.) de la superficie del biocarbón, provocando una disminución en las cargas negativas superficiales (Ghodake y col., 2021; Tareq y col., 2019; Yaashikaa y col., 2019). Las cargas negativas aumentan la capacidad de intercambio catiónico en la superficie del biocarbón (Qiu y col., 2021a).

3.4.Grupos funcionales

Al calentar la biomasa a temperaturas de entre 350 y 650 °C sus enlaces químicos se rompen y reordenan, provocando la formación de nuevos grupos funcionales entre los que se encuentran los grupos carboxilo, quinona, éter, hidroxilo, lactona, anhídrido, pirona, piridina, fenol, entre otros más (Tomczyk y col., 2020). Los grupos funcionales se describen en la Figura 3.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

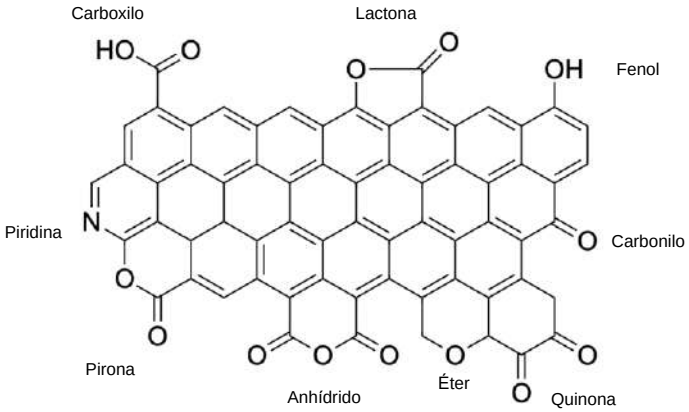


Figura 3. Grupos funcionales superficiales en el biocarbón.

El biocarbón que se produce a temperaturas altas (entre 600 y 700 °C), debido a la deshidratación y desoxigenación de la biomasa, tiene una menor cantidad de grupos funcionales que contienen hidrogeno (H) y oxígeno (O), por lo que la capacidad de intercambio catiónico disminuye y la capacidad de intercambio aniónico aumenta. El biocarbón producido a temperaturas bajas (entre 300 y 400 °C) presenta mayor capacidad de intercambio catiónico (Pandey y col., 2020; Tomczyk y col., 2020). De acuerdo con la materia prima utilizada en la producción del biocarbón se pueden encontrar diferentes grupos funcionales en su superficie. Los grupos carboxilo, carbonilo, amino, e hidroxilo, son afines a los cationes metálicos (ej. Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+, K^+, Na^+) (Qiu y col., 2021b).

4. Materia prima (biomasa) para la elaboración del biocarbón

La elección de la materia prima o biomasa de la que estará elaborado (fabricado) el biocarbón es una elección muy importante ya que cada una de esta cuenta con diferentes propiedades fisicoquímicas lo que determinará las características y propiedades del biocarbón. Los biocarbones se pueden producir de una amplia variedad de materia prima entre los que se encuentran los residuos orgánicos, residuos agrícolas, residuos agroindustriales, residuos de alimentos, lodos de depuradora, cultivos bioenergéticos, residuos forestales, estiércol de ganado y residuos agrícolas de biomasa lignocelulósica (bagazo de caña de azúcar, residuos de papel, residuos de cartón, rastrojo de maíz, paja de trigo, entre muchos otros) (Ghodake y

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

col., 2021; Gope y Saha, 2021). A continuación, se describirán las fuentes vegetales debido a los beneficios que estas representan.

La biomasa lignocelulósica es una opción adecuada debido a que es un recurso renovable y presenta alta disponibilidad, su fuente principal son los residuos agrícolas y los residuos forestales. Los componentes principales de la biomasa lignocelulósica son la hemicelulosa, la celulosa y la lignina (S y P, 2019; Yaashikaa y col., 2019), además de pequeñas cantidades de ceniza y extractos (Wang y col., 2017), los porcentajes en peso de estos componentes varían de acuerdo a la materia prima, en la Tabla 1 se muestran diversas materias primas y su composición (%) de biomasa lignocelulósica.

Tabla 1. – Composición lignocelulósica, ceniza y extractos (Ex) de diferentes materias primas.

Materia prima	Componente químico (%)					Referencia
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Ceniza	Ex	
Hierba de elefante	39.14	19.9	6.18	6.9	-	(Braga y col., 2014)
Cáñamo	53.86	10.60	8.76	5.25	-	(Kikas y col., 2016)
Roble	43.2	21.9	35.4	0.2	1.6	(Yu y col., 2017)
Pino	45.6	24.0	26.8	1.1	5.7	(Yu y col., 2017)
Cáscara de nuez	20.47	20.16	45.93	4.48	6.22	(Zhang y col., 2020)

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

La celulosa es el principal componente estructural de la biomasa lignocelulósica, la cual forma las paredes celulares primarias de las plantas verdes. Es el polímero orgánico que más abunda en la naturaleza, es un polisacárido de cadena lineal de unidades repetidas de D-glucosa (piranosa) que se conectan por enlaces acetilo (enlace glucosídico β(1→4)), la estructura de la celulosa se muestra en la Figura 4. La celulosa es muy poco soluble en agua debido a que sus moléculas son largas y lineales. Las cadenas de celulosa (20-300) se agrupan y forman fibras de celulosa, estas se unen por enlaces de van der Waals y enlaces de hidrógeno creando microfibrillas. Estas microfibrillas largas le dan fuerza y forma a la pared celular, ya que estas están situadas como una malla entrecruzada. Los enlaces de hidrogeno formados proporcionan a la celulosa una estructura cristalina, lo que le brinda resistencia mecánica y estabilidad química. Su estructura cristalina le proporciona a la planta fuerza y dureza a las raíces, tallos y hojas (Dhyani y Bhaskar, 2019; Pecha y Garcia-Perez, 2020).

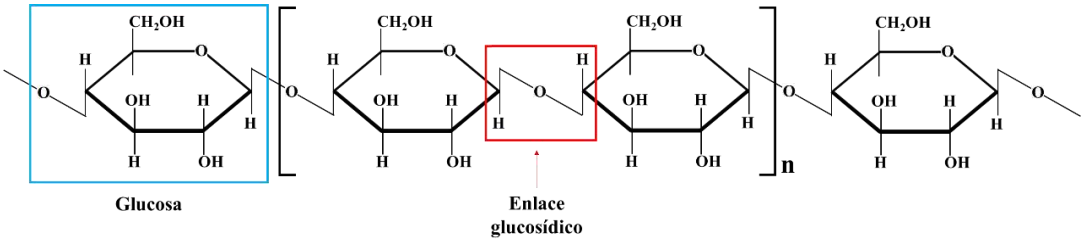


Figura 4. Estructura de la celulosa. Adaptado de Benaimeche y col., (2020).

La hemicelulosa es el segundo compuesto más abundante en la biomasa lignocelulósica, lo que constituye de un 25-33% dependiendo la materia vegetal. Esta rodea a la celulosa y crea una conexión entre la celulosa y la lignina. La hemicelulosa está compuesta de azucares al igual que la celulosa, pero a diferencia de esta la hemicelulosa está formada por diferentes tipos de monómeros (como manosa, arabinosa, glucosa, galactosa, xilosa, y ácido glucurónico) lo que la convierte en un heteropolisacárido, como se muestra en la Figura 5. La hemicelulosa tiene una estructura amorfa, las cadenas se pueden ramificar, cuentan con poca resistencia física, tiene una gran capacidad de absorber agua por lo que se dice que es

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

soluble, su composición varía de acuerdo con la especie vegetal (Badui Dergal, 2006; Dhyani y Bhaskar, 2018, 2019; Pecha y Garcia-Perez, 2020).

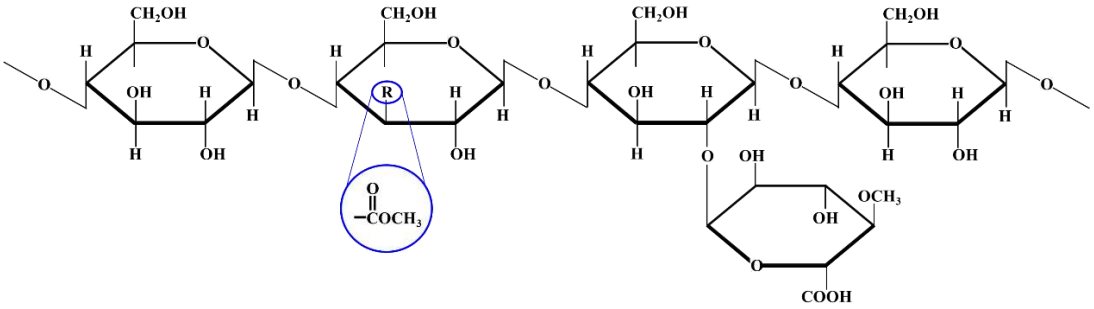


Figura 5. Estructura de la hemicelulosa. Adaptado de Flaris y Singh, (2009).

La lignina es un polímero fenólico que tiene una matriz aromática, reticulada y tridimensional, el cual cuenta con una diversidad de monómeros de fenilpropano sustituidas con “hidroxilo” y “metoxi” con enlaces diferentes. Su estructura química varía de una planta a otra debido a que sus unidades estructurales no suelen repetirse de forma regular, sus principales unidades son guayacilo, siringilo y p-hidroxifenilo (ver Figura 6). La lignina se encuentra presente en la capa exterior de las fibras y tiene como propósito brindarle rigidez estructural y mantener unidas las fibras de los polisacáridos, así como para el transporte de agua y en defensa microbiana. En la estructura interna de la planta, la hemicelulosa recubre las microfibrillas de celulosa, los espacios vacíos que quedan de esta unión se llenan de lignina, la cual ayuda a unir a la celulosa y la hemicelulosa dentro de la pared celular y así protegerlas cuando el agua pase a través de la planta (Chávez Sifontes y Domine, 2013; Dhyani y Bhaskar, 2018; Pecha y Garcia-Perez, 2020). Si la cantidad de lignina es mayor a la de la celulosa el biocarbón tendrá un alto rendimiento, asimismo si la biomasa contiene un mayor contenido de lignina generara en el biocarbón una mayor porosidad (Gope y Saha, 2021).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

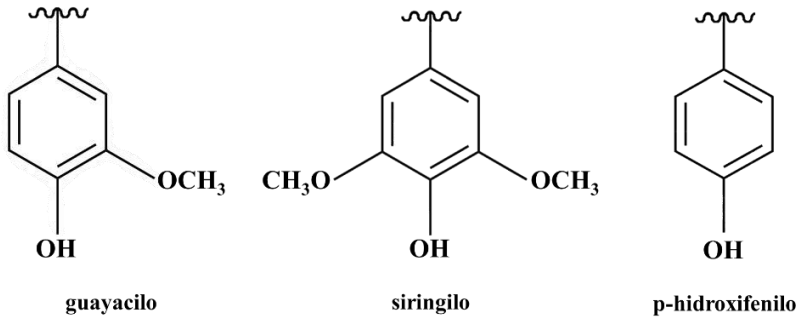


Figura 6. Unidades principales de la lignina.

La ceniza es una pequeña cantidad de compuestos inorgánicos que se encuentran presentes en la biomasa. Esta se compone principalmente de fósforo, calcio, potasio, cloro, silicio, magnesio, azufre, sodio, etc. La cantidad de cenizas encontradas en la biomasa es variada, pero puede alcanzar hasta un 15% en residuos agrícolas y biomasa herbácea (Dhyani y Bhaskar, 2018, 2019).

Los extractos son los productos naturales adyacentes a la pared celular de la biomasa lignocelulósica, como por ejemplo los aceites esenciales, proteínas, almidones, pectinas, azucares simples, saponinas, grasas, glucósidos, ceras, alcaloides, gomas, mucílagos, fenólicos, terpenos y resinas, estos se pueden extraer muy fácilmente al utilizar disolventes inertes (acetona, agua fría, solución de alcohol benceno y éter). Estos extractos se forman debido a los procesos metabólicos de las plantas, sus funciones son como reserva de energía, intermediarios en el metabolismo y actúan como defensores de las plantas contra los microbios y los insectos (Dhyani y Bhaskar, 2018, 2019).

5. Producción de biocarbón

Los métodos comunes para la obtención de biocarbones son la pirolisis, la gasificación y la carbonización hidrotermal (Wang y Wang, 2019). La pirolisis, la gasificación y la carbonización hidrotermal son algunos de los métodos de producción (Wang y Wang, 2019), estos se describirán a continuación.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

La pirólisis es la degradación de la biomasa por medio del calor en ausencia de oxígeno, como resultado de este proceso se obtiene gas de síntesis, residuo líquido (bioaceite), y residuo sólido (biocarbón) (Escalante y col., 2016). De acuerdo al tiempo y temperatura la pirólisis se puede clasificar como pirolisis lenta, media y rápida, siendo la pirolisis lenta la que favorece el rendimiento de biocarbón en comparación con la pirolisis rápida (Inyang y Dickenson, 2015; Pan y col., 2021).

La temperatura es uno de los factores más importantes en el proceso ya que esta causa la pérdida de carbono cuando se está preparando y afecta directamente la estructura de los poros y la micromorfología del biocarbón (Xie y col., 2021). En la Tabla 2 se muestran las diferencias en los tres tipos de pirólisis (Afanasjeva y col., 2018; Dhyani y Bhaskar, 2019).

Tabla 2. – Tipos de pirólisis, condiciones y rendimiento de productos.

Tipo de pirólisis	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Rendimiento del producto (%)		
			Líquido	Gas	Sólido
Lenta	300-400	horas-días	25-30	25-35	30-40
Intermedia	300-500	5-30 s	40-50	25	25-30
Rápida	400-950	1-2 s	60-75	13-20	12-20

El rendimiento de los productos obtenidos del proceso de pirólisis (gas de síntesis, bioaceite y biocarbón) dependen de la composición de la biomasa lignocelulósica. La celulosa, hemicelulosa y la lignina se descomponen a diferentes temperaturas, las cuales siguen diferentes mecanismos de reacción (reacciones de condensación, deshidratación, des-hidrogenación, producción de coque, rompimiento, aromatización y reorganización) y diferentes velocidades de descomposición (Afanasjeva y col., 2018; Dhyani y Bhaskar, 2019). En la Tabla 3 se muestran las temperaturas de descomposición de la biomasa lignocelulósica mediante el proceso de pirólisis (Yaashikaa y col., 2019).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tabla 3. – Temperatura de descomposición de la biomasa lignocelulósica

Biomasa lignocelulósica	Temperatura de descomposición (°C)
Celulosa	305-375
Hemicelulosa	200-350
Lignina	250-500

En la gasificación, la biomasa, se quema en una sucesión de dos reacciones, la primera es la carbonización con gasificación, por ejemplo, en la madera consiste en la conversión de esta a carbón, lo que es equivalente a la pirolisis lenta. Después de la conversión a carbón, la segunda reacción se realiza a una temperatura mayor que la primera, convirtiendo el carbón formado en ceniza y se le conoce como gasificación de carbón. Si hay exceso de oxígeno el carbón será consumido y solo quedarán cenizas, en cambio sí hay poca cantidad de oxígeno, solo una parte del carbón será consumido y algunos remanentes saldrán por el fondo del gasificador (Escalante y col., 2016). Este proceso de combustión parcial de la biomasa se da a temperaturas de 600-1200 °C y a un tiempo de residencia de 10 a 20 s. Los productos obtenidos son principalmente una combinación de gases (H_2, CH_4, CO y CO_2), por ejemplo, gas de síntesis, también se obtiene biocarbón con un rendimiento menor al 10% y ceniza (Afanasjeva y col., 2017; Lee y col., 2019).

La carbonización hidrotermal o torrefacción húmeda es un tratamiento que se lleva a cabo a temperaturas entre 200 °C y 250 °C, así como a elevada presión (2-10 MPa), en ausencia de oxígeno y utilizando agua en estado subcrítico como medio. El producto obtenido se denomina hidrocarburo, el cual presenta mayor densidad de masa y energía en comparación a la biomasa bruta. La principal ventaja de este tratamiento es que puede convertir la biomasa húmeda sin la necesidad de utilizar un proceso de secado de alta energía antes o durante el

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

proceso de degradación por pirólisis y que requiere menos energía que otros tratamientos térmicos. Las principales aplicaciones del hidrocarburo obtenido son la mejora del suelo, el secuestro de carbono, la bioenergía, producción y remediación de la contaminación de las aguas residuales (Álvarez y col., 2020; Aragon-Briceño y col., 2021).

6. Modificación del biocarbón

El biocarbón cuenta con características y propiedades físicas y químicas diferentes, las cuales ayudan a remover contaminantes, estas propiedades se pueden mejorar mediante modificación o activación, ya sea a la materia prima (antes del proceso de pirólisis) o al biocarbón (después del proceso de pirólisis). El biocarbón se puede modificar por activación física, química, así como la creación de biocarbones compuestos, principalmente se modifican para incrementar la superficie del biocarbón, el área superficial y el volumen de poros.

6.1 Activación física

El proceso de activación física se realiza al biocarbón (posterior al proceso de pirólisis). Esta activación consta de dos procesos o pasos importantes, el primero es la carbonización de la biomasa y la segunda es la modificación por agentes en estado gaseoso (O_2, CO_2, N_2, etc.). La activación por medio de gases depende del biocarbón y las condiciones al realizar el proceso. Además de los agentes gaseosos la activación física se puede realizar con vapor. Este consiste en circular vapor sobrecalentado a temperaturas entre 650 y 950 °C a través de los poros del biocarbón (Yaashikaa y col., 2019; Zoroufchi y col., 2020).

Los principales factores por considerar en esta modificación son el vapor o gas, la temperatura y el tiempo. Al realizar la activación física se incrementa el área superficial y el volumen de los poros del biocarbón, asimismo se incrementan los grupos funcionales, la polaridad y la hidrofobicidad en la superficie. En la activación con vapor se intercambia el oxígeno del agua con el carbono para generar óxidos superficiales e hidrogeno, mientras que

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

en la activación con gas, se eliminan los compuestos volátiles y se agrandan los poros (Amalina y col., 2022; Yaashikaa y col., 2019; Zoroufchi y col., 2020).

6.2 Activación química

La activación química se utiliza con más frecuencia en comparación con la activación física, debido a que se necesita menor temperatura para su activación y se obtiene un mayor rendimiento del biocarbón (Guo y Rockstraw, 2007). La activación se puede realizar antes o después del proceso de pirólisis (en la materia prima o el biocarbón) (Zoroufchi y col., 2020), este proceso de activación consiste en mezclar la materia prima o el biocarbón con un agente químico, ya sea un ácido o una base (Cha y col., 2016), con la finalidad de modificar la estructura y los poros de la superficie, así como introducir grupos funcionales (Zoroufchi y col., 2020).

La activación ácida consiste en impregnar la materia prima o el biocarbón en una solución con el agente ácido en una proporción de 1:10 (materia prima o biocarbón:ácido) para remojo variable (Tareq y col., 2019) a una temperatura de hasta 120 °C (Yaashikaa y col., 2019). Entre los ácidos comúnmente utilizados se encuentra el ácido fosfórico (H_3PO_4) el cual es el más utilizado debido a que presenta una naturaleza ecológica, ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO_3) (Tareq y col., 2019). En esta activación con ácidos se eliminan las impurezas y los residuos metálicos de la superficie del carbón, se generan en la superficie del biocarbón grupos funcionales carboxílicos lo que favorece la adsorción de cationes (Zoroufchi y col., 2020).

En la activación con bases (álcalis) se han realizado un gran número de métodos para el proceso en el que se varió la temperatura, la concentración de base y la duración. Los agentes químicos básicos usualmente usados son hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH) (Tareq y col., 2019; J. Wang y Wang, 2019). En esta activación se eliminan las cenizas de la superficie, incrementa el área superficial del biocarbón y se generan grupos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

hidroxilo (grupos funcionales que contienen oxígeno) ayudando la adsorción de oxianiones (Wang y Wang, 2019; Zoroufchi y col., 2020).

7. Biocarbones compuestos

Los biocarbones compuestos implican la creación de grupos funcionales totalmente nuevos que no existían anteriormente en la superficie del biocarbón, esto se hace para modificar las propiedades superficiales del biocarbón y aumentar la capacidad de adsorción de numerosos contaminantes. Los biocarbones compuestos se obtienen a partir de la interacción, modificación o funcionalización de su superficie con óxidos metálicos, arcillas, materiales carbonosos (óxido de grafeno o nanotubos de carbono), compuestos orgánicos (quitosano o aminoácidos) o microorganismos (biopelículas) (Huang y col., 2021; Sizmur y col., 2017). A continuación, se describen y/o explican los diferentes agentes para su modificación.

7.1. Óxidos metálicos

El objetivo de modificar biocarbones con óxidos metálicos es garantizar una distribución uniforme del metal sobre la superficie del biocarbón y así aumentar el área superficial del óxido metálico, estos pueden cambiar y mejorar las características de adsorción, catalíticas y de magnetismo. Por sus propiedades magnéticas se pueden utilizar para reciclar el biocarbón, ya que los óxidos metálicos de hierro pueden aumentar las características magnéticas de los biocarbones de manera que se puedan recolectar/recuperar al ponerse en contacto con un material imantado.

Los metales comúnmente usados son hierro, magnesio, aluminio y manganeso (Sizmur y col., 2017; Wang y Wang, 2019). El hierro es el metal más usado para la impregnación de óxidos metálicos, este es uno de los metales más abundantes en la naturaleza. Los minerales de hierro más importantes son la ferrihidrita, ferroxihita, lepidocrocita, akaganeita, goethita, hematita y la magnetita, ya que esta es responsable de las propiedades magnéticas de las rocas (Cornell y Schwertmann, 2003; Lu y col., 2011).

7.2. Arcillas

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Los minerales arcillosos son materiales económicos, fáciles de extraer, no tóxicos, con atractivas propiedades físicas y químicas que incluye la forma y el tamaño de las partículas (estructura laminar), así como el área y la química superficial. Estos minerales al ser impregnados al biocarbón pueden modificar su composición y sus propiedades físicas de acuerdo con la arcilla utilizada, incrementando la capacidad de adsorción del biocarbón, adsorbiendo diversos contaminantes (tintes orgánicos, antibióticos, metales pesados, entre otros) presentes en el suelo y agua a través del intercambio iónico (Sizmur y col., 2017; Yao y col., 2014; Zhao y col., 2023).

Entre los principales minerales arcillosos se encuentra la bentonita, la caolinita, y la montmorillonita, las cuales se caracterizan por su alta área superficial, su capacidad de intercambio catiónico y su capacidad de adsorción (Arif y col., 2021; Marcińczyk y col., 2022; Yao y col., 2014).

7.4. Materiales carbonosos

Los materiales carbonosos como el grafeno y los nanotubos de carbono muestran excelentes propiedades fisicoquímicas. El grafeno presenta una gran área superficial, resistencia mecánica, interacciones π-π, alta movilidad de electrones (e^-), conductividad térmica y una extraordinaria capacidad de absorción (Fang y col., 2020). Los nanotubos de carbono se componen a partir de láminas de grafeno enrolladas entre si brindándole forma cilíndrica, presentando una alta área superficial, gran cantidad de sitios activos, tamaño de poro ajustable (estructura porosa), flexibilidad, afinidad electrónica y resistencia mecánica, sin embargo, comparado al grafeno presenta una menor capacidad de adsorción (Soffian y col., 2022).

Los biocarbones mejoran significativamente sus propiedades fisicoquímicas al combinar ambos materiales (biocarbón/material carbonoso), aumentando sus propiedades mecánicas, el área superficial, la porosidad y la capacidad de adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Sizmur y col., 2017; Wang y Wang, 2019). No obstante, el alto costo al preparar el grafeno y los nanotubos de carbono restringen su aplicación (Wang y Wang, 2019).

7.5. Compuestos orgánicos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Al incorporar grupos aminos a la superficie del biocarbón, puede mejorar la capacidad de absorción al crear fuertes lazos con la superficie del biocarbón como con los contaminantes de la solución. Esta incorporación se puede lograr mediante simples reacciones químicas o al mezclar biocarbones con polímeros ricos en grupos amino, como polietilenimina o quitosano (Sizmur y col., 2017).

7.6. Microorganismos

La modificación se puede realizar mediante el empleo de microbios como las bacterias (Yaashikaa y col., 2019), el biocarbón al ser un material inerte de gran superficie cuenta con las condiciones necesarias para favorecer la colonización y el crecimiento de biopelículas con propiedades favorables. La inoculación de microorganismos se ha realizado principalmente para facilitar la biodegradación de contaminantes orgánicos en el medio ambiente (Sizmur y col., 2017).

8. Caracterización del biocarbón

Para determinar la composición elemental, propiedades fisicoquímicas, de superficie y estructurales del biocarbón, así como su capacidad para la remediación ambiental u otras aplicaciones (aplicabilidad) se realiza el análisis o caracterización (fisicoquímica, superficial y estructural) del biocarbón (Igalavithana y col., 2017; Yaashikaa y col., 2020), el cual consiste en utilizar diferentes técnicas o instrumentos como análisis termogravimétrico (TGA, de Thermo-gravimetric analysis), las técnicas de plasma de acoplamiento inductivo (ICP, de inductively-coupled plasma), análisis del área superficial especifica mediante BET (Brunauer-Emmett-Teller), microscopía electrónica de barrido (SEM, de Scanning electron microscopy), espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS, de Energy dispersive X-ray spectrometer), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, de Fourier transform infrared spectroscopy), espectroscopía Raman, espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS, de X-ray photoelectron spectroscopy), difracción de rayos X (XRD, de X-ray diffraction), microscopía electrónica de transmisión (TEM, de Transmission electron microscopy), entre otras más.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

8.1.Análisis de proximidad

El análisis de proximidad o proximal se utiliza para determinar la humedad, el contenido de carbono fijo, materia residente, ceniza y la materia volátil presentes en el biocarbón (Ghodake y col., 2021; Igalavithana y col., 2017). La ceniza se compone de compuestos inorgánicos (minerales) y la materia volátil se compone de elementos orgánicos principalmente de carbono (C), hidrogeno (H), oxígeno (O) y azufre (S) (Igalavithana y col., 2017). El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica la cual mide el cambio de masa de la biomasa que se somete a un ambiente a altas temperaturas (Ghodake y col., 2021), se utiliza para determinar el contenido de humedad, ceniza y materia volátil, mientras que la cantidad de materia residente se obtiene al calcular la diferencia entre el peso inicial de la muestra y la cantidad de humedad, la materia volátil y la cantidad de cenizas (Igalavithana y col., 2017).

8.2.Análisis final o definitivo

Este análisis se usa para determinar las cantidades individuales de los elementos orgánicos del biocarbón (C, H, O, N y S) y de la ceniza, para así conocer la composición elemental detallada del biocarbón. Para determinar las cantidades de C, H, O, N y S respectivamente es importante restar los contenidos de humedad y ceniza obtenidos en el análisis de proximidad.

La ceniza se compone de diferentes minerales, y se puede dividir en solubles en ácido y no solubles en ácido. La cantidad de elementos o minerales presentes en la ceniza se determina por la biomasa o materia prima que se utiliza para la elaboración del biocarbón (Igalavithana y col., 2017). Algunas de las técnicas para detectar, identificar y conocer la cantidad de las especies inorgánicas del biocarbón y de la ceniza, son las técnicas de plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de masas (ICP-MS), plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de emisión atómica (ICP-AES) y plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) (Ghodake y col., 2021).

8.3.Análisis fisicoquímico

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Las propiedades físicas y químicas del biocarbón dependen del tipo de materia prima utilizada, así como de las condiciones en el proceso de producción del biocarbón (Ahmad y col., 2014). Algunas de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón son el pH, área superficial, densidad aparente y porosidad.

El pH varía considerablemente debido a la materia prima utilizada, así como la temperatura en la producción del biocarbón, a mayor temperatura se obtiene un pH más alto debido a la perdida elevada de materia volátil y a la mejora de cationes básicos (Haris y col., 2021). Para la determinación del pH se han utilizado diferentes métodos, el más común consiste en mezclar una pequeña cantidad de biocarbón y agua desionizada en una proporción de 1:20 (Igalavithana y col., 2017).

Para determinar el área superficial del biocarbón se utilizan diversos métodos, los más usuales son la adsorción de CO_2 (a una temperatura de 273K (Weber y Quicker, 2018)) el cual se utiliza para caracterizar poros con un tamaño menor a 2 nm, y la adsorción de N_2 (a una temperatura de 77 K) vía análisis del área superficial específica mediante BET (Brunauer-Emmett-Teller) para caracterizar microporos y mesoporos del biocarbón (Brewer y col., 2014), esta técnica no puede caracterizar macroporos (Leng y col., 2021).

La densidad aparente del biocarbón está relacionada con la temperatura del proceso de producción del biocarbón, ya que con el aumento de temperatura se generan nuevos poros y el valor de la densidad aparente disminuye debido a la porosidad del biocarbón y el bajo peso (Igalavithana y col., 2017), esto se puede determinar mediante el método de porosimetría de mercurio, el cual además de determinar la densidad aparente, determina los parámetros de la estructura de poros y la porosidad (Igalavithana y col., 2017; Yang y col., 2021).

8.4.Análisis superficial

Para conocer la morfología del biocarbón se utiliza la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), la cual muestra la imagen de la superficie del biocarbón proporcionando

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

información acerca de los poros, materiales y fisuras presentes en su superficie (Novak y Johnson, 2018). Esta técnica se puede utilizar antes y/o después del proceso de adsorción (Yaashikaa y col., 2020).

Para determinar los elementos presentes en la superficie del biocarbón se utiliza la técnica conjunta de microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), comúnmente se utiliza para determinar los elementos presentes después de adsorber contaminantes, la desventaja de esta técnica es que no es adecuado para determinar contaminantes orgánicos (Yaashikaa y col., 2020).

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica vibratoria, la cual determina los grupos funcionales (carboxilo, hidroxilo, carbonilo, etc.) presentes en la superficie del biocarbón, así como su mineralogía (Haris y col., 2021; Igalavithana y col., 2017).

La espectroscopía Raman se emplea para identificar las estructuras amorfas y del grafito, la distribución de defectos estructurales y la forma y el tamaño de los nanomateriales. Las bandas Raman denominadas banda G (1575 cm^{-1}) y banda D (1360 cm^{-1}) se utilizan para diferenciar diferentes alótropos, así como conocer sus características estructurales, de composición y de conductividad. La banda G aparece debido al modo de simetría E_{2g} de la red de carbono hexagonal y la banda D es la medida del desorden de la red del carbono (Igalavithana y col., 2017; Roy y col., 2021). La espectroscopia Raman es una técnica con alto grado de sensibilidad, fácil preparación de la muestra y una menor interferencia, sin embargo, tiene un elevado costo (Yaashikaa y col., 2020).

Los biocarbones tienen grupos funcionales de tipo ácido y básico en su superficie (Xiong y col., 2021), la titulación de Boehm se utiliza para la caracterización de grupos funcionales ácidos, el cuál divide a estos grupos en tres categorías, las cuales son carboxílico, lactónico y fenólico (Tsechansky y Graber, 2014).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Para conocer los estados de enlace químico, la estructura electrónica y los compuestos químicos superficiales del biocarbón se utiliza la técnica de espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) (Huang y Best, 2014; Igalavithana y col., 2017).

8.5.Análisis estructural/molecular

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica para evaluar la estabilidad térmica de la materia prima (biomasa) y el biocarbón (Subratti y col., 2021), así como su estabilidad estructural (Igalavithana y col., 2017). Con el aumento de la temperatura en la elaboración del biocarbón se descompone la biomasa lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina), por lo que se degradan térmicamente (Kristanto y col., 2021), el TGA detecta la pérdida de peso del biocarbón debido a la degradación térmica de la biomasa, provocado por el aumento de la temperatura y la velocidad de calentamiento (Igalavithana y col., 2017).

Para determinar la estructura y fases cristalinas del biocarbón se utiliza la técnica de difracción de rayos X (XRD) (Yaashikaa y col., 2020), esta técnica proporciona información sobre las fases mineralógicas del biocarbón que influyen en sus propiedades para su posterior aplicación (Amen y col., 2020; Sahoo y col., 2021). La microscopía electrónica de transmisión (TEM) se emplea para caracterizar la morfología del biocarbón (Ma y col., 2021) y así conocer la estructura del biocarbón y su composición química (Calderón, 2020) a través imágenes (Calderón, 2020; Walther, 2017).

Otra técnica empleada para conocer la composición de la estructura del biocarbón es la resonancia magnética nuclear (NMR, de Nuclear magnetic resonance), principalmente se utiliza para determinar la cantidad de hidrocarburos aromáticos y alifáticos en el biocarbón, así como detalles sobre los grupos funcionales que se encuentran presentes, una desventaja de esta técnica es que se pueden interrumpir las señales del NMR debido a la presencia de elementos (minerales) ferromagnéticos (Igalavithana y col., 2017; Yaashikaa y col., 2020).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

La técnica de fluorescencia de rayos X (XRF, de X-ray fluorescence spectroscopy) determina la composición química del biocarbón (Ahn y col., 2021), esta técnica es especialmente útil para identificar componentes inorgánicos y para el análisis de la composición de cenizas en el biocarbón (Igalavithana y col., 2017).

9. Aplicaciones del biocarbón

Debido a las distintivas características y propiedades del biocarbón como área superficial, porosidad, tamaño de poros, volumen de poros, grupos funcionales, entre otras más, y a su fácil y económica elaboración, cuenta con una amplia variedad de aplicaciones, su principal aplicación es en el mejoramiento del suelo, además de remediación de contaminantes en el medio ambiente, en la agricultura, catálisis, supercondensadores, tratamiento de aguas residuales, secuestro de carbón, mitigación del cambio climático, mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, en materiales de construcción y materiales portadores de microorganismos (Igalavithana y col., 2017; Yaashikaa y col., 2020), a continuación se mencionan algunas de sus aplicaciones.

9.1. Aplicaciones en el suelo

Debido al aumento de dióxido de carbono en el ambiente, así como la elevada descomposición de residuos orgánicos en el suelo han provocado un grave problema, por lo que se han realizado diversos estudios para la remediación de este problema. El biocarbón debido a su composición y estructura han demostrado ser de gran utilidad, ya que este aumenta la productividad de los cultivos, mejora la fertilidad del suelo y su estructura, así como la reducción de los gases de efecto invernadero e impulsa el secuestro de carbono (Zhang y col., 2019), además de otras funciones.

Existen investigaciones donde utilizaron biocarbones para remediar suelos contaminados por metales pesados, Tang y col., (2022) realizaron experimentos de campo para indagar los efectos de un biocarbón ordinario y uno modificado con polietilenimina, para la remediación del suelo contaminado por cadmio (Cd), en el cual se obtuvo que el efecto del biocarbón

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

modificado tuvo mayores mejoras en el suelo que el biocarbón ordinario, además de efectos importantes sobre las actividades de la ureasa, hidrogenasa y la fosfatasa del suelo, el efecto del biocarbón modificado sobre el cadmio fue más significativo, el biocarbón podría mejorar la estabilidad del suelo y disminuir la cantidad de cadmio en el trigo.

Se han realizado investigaciones en las cuales se utilizan biocarbones para reducir la toxicidad de fungicidas en el suelo, Zhang y col., (2021) utilizaron un biocarbón procedente de paja de maíz para estudiar los efectos del biocarbón sobre los microbios presentes en el suelo contaminado con piraclostrobina, además de estudiar la agregación, las actividades enzimáticas y la lombriz de tierra (*Eisenia fetida*), en este estudio demostró que el biocarbón aumentó el contenido de macroagregados del suelo, así como la mejora de las poblaciones microbianas y las actividades enzimáticas. Además, se aceleró la degradación de la piraclostrobina del suelo y eliminó su toxicidad para los microorganismos presentes. El biocarbón y las lombrices de tierra juntos mejoran las condiciones del suelo y aceleran la degradación del contaminante (piraclostrobina).

Existe una gran cantidad de investigaciones, algunas de ellas para mejorar las propiedades del suelo. Ahmad y col., (2022) estudiaron el efecto del biocarbón proveniente de lodos de depuradora sobre los nutrientes del suelo, la población microbiana y la biomasa vegetal, a partir de este estudio se concluyó que los lodos de depuradora son un grave problema ambiental ya que contienen metaloides. El biocarbón ayuda a retener la humedad del suelo y proveen nutrientes esenciales (como P, Zn, Mn y Mg) a las plantas, por lo que ayuda al crecimiento de las plantas *Trigonella foenum-graecum* y *Cicer arietinum*, así como la mejora del microbio beneficioso que ayuda en el crecimiento, además el biocarbón modificó las propiedades químicas y físicas del suelo, mejoró la composición de la población bacteriana y el ciclo de nutrientes del suelo.

9.2. Otras aplicaciones

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

El biocarbón tiene una amplia variedad de aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales, ya sea de contaminantes orgánicos e inorgánicos. El uso del biocarbones elaborados a partir de madera y biomasa de maíz se utilizaron para eliminar compuestos farmacéuticos activos, fragmentos de ARN y ADN de agua residuales (Bimová y col., 2021).

Además, el biocarbón se ha utilizado para aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero (CH_4, CO_2, N_2O y NH_3) durante el compostaje, el cual a tenido efectos positivos. La materia prima y las condiciones de producción, el tamaño y la cantidad de biocarbón influyen significativamente para reducir los gases de efecto invernadero (GEI) durante el compostaje, los residuos de cultivos y biomasa leñosa tienen mayor efecto en la reducción de CH_4, NH_3 y N_2O durante el compostaje, el biocarbón que se genera a temperaturas entre 200 y 500 ^oC son más beneficioso para reducir las emisiones de NH_3 y los biocarbones que se generan a temperaturas entre 500 y 900 ^oC son más eficaces para reducir las emisiones de N_2O y CH_4 (Yin y col., 2021).

Debido al aumento de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, se han incrementado los niveles de emisiones que provocan el calentamiento global, el biocarbón se ha empleado para reducir estas emisiones (Panwar y col., 2019). Yang y col., (2020) informó que al crear y utilizar biocarbón junto con la variedad de plantas en tierras de cultivo degradadas y abandonadas, interactúan con los factores bióticos y abióticos del ecosistema los cuales ayudan a maximizar los impactos positivos en el secuestro de carbono y en las emisiones de GEI.

Hay un incremento en la demanda de fuentes de energía renovables y sostenibles, ya que el supercondensador es un dispositivo de almacenamiento de energía ha ganado especial atención debido a su alta densidad de potencia, su estabilidad de ciclo y su capacidad de carga y descarga (Li y col., 2021). El biocarbón debido a su capacidad de almacenamiento de energía se emplea como electrodo de supercondensador, Ma y col., (2021) prepararon un biocarbón a partir de la saponina del té, mediante la técnica de pirólisis y se activó

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

químicamente, el biocarbón cuenta con una estructura porosa y un excelente rendimiento electroquímico, se concluyó que este biocarbón tiene un gran potencial para aplicarlo como material de electrodo superconductor ecológico y de bajo costo.

Otra de las aplicaciones del biocarbón es en los materiales de construcción, hay diversos materiales de construcción en los que el biocarbón mejora sus propiedades (Igalavithana y col., 2017). Se ha demostrado que el biocarbón puede aumentar la resistencia a la flexión así como el aumento de la energía de fractura de los compuestos cementosos (Restuccia y col., 2020).

Conclusiones

Este trabajo contribuye en la revisión del estado del arte de las diferentes propiedades, la caracterización fisicoquímica y aplicaciones del biocarbón, debido a que el rápido aumento de la urbanización e industrialización ha generado un grave problema ambiental a nivel mundial por lo que el uso del biocarbón se ha vuelto vital para tratar de remediar estos problemas. A pesar de las diversas aplicaciones del biocarbón, con el incremento de problemas por solucionar se ha visto en la necesidad de realizar estudios más meticulosos y rigurosos para solucionarlos, donde el biocarbón sea una opción factible debido a su bajo costo, sus propiedades específicas y su sustentabilidad, generando nuevas áreas de oportunidad para su aplicación y de esta manera generar y aportar nuevos conocimientos para posteriores investigaciones.

Agradecimientos

Guel-Najar agradece la beca (620952) otorgada por el CONACyT. Los autores agradecen al FONCyT (COAH-2021-C15-C013) por el apoyo otorgado para la realización de esta revisión y el proyecto de investigación.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Referencias

Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2017). Biomasa Lignocelulósica. Parte I: Transformación de biomasa. *Journal of Science with Technological Applications*, *3*: 27–43.

Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2018). Lignocellulosic biomass. Part II: Tendence in the biomass pyrolysis. *Journal of Science with Technological Applications*, *5*: 4–22. https://doi.org/10.34294/J.JSTA.18.5.31

Ahmad, A., Chowdhary, P., Khan, N., Chaurasia, D., Varjani, S., Pandey, A., & Chaturvedi, P. (2022). Effect of sewage sludge biochar on the soil nutrient, microbial abundance, and plant biomass: A sustainable approach towards mitigation of solid waste. *Chemosphere*, *287:* 1–9. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132112

Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, *99*: 19–33. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.10.071

Ahn, Y., Cho, D. W., Ahmad, W., Jo, J., Jurng, J., Kurade, M. B., Jeon, B. H., & Choi, J. (2021). Efficient removal of formaldehyde using metal-biochar derived from acid mine drainage sludge and spent coffee waste. *Journal of Environmental Management*, *298*: 1–8. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113468

Álvarez, M. L., Gascó, G., Palacios, T., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2020). Fe oxides-biochar composites produced by hydrothermal carbonization and pyrolysis of biomass waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *151*: 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104893

Amalina, F., Syukor Abd Razak, A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Advanced techniques in the production of biochar from lignocellulosic biomass and environmental applications. *Cleaner Materials*, *6*: 100137.

https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100137

Amen, R., Bashir, H., Bibi, I., Shaheen, S. M., Niazi, N. K., Shahid, M., Hussain, M. M., Antoniadis, V., Shakoor, M. B., Al-Solaimani, S. G., Wang, H., Bundschuh, J., & Rinklebe, J. (2020). A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: The significance of modification and redox reactions. *Chemical Engineering Journal*, *396*: 1–17. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125195

Anae, J., Ahmad, N., Kumar, V., Thakur, V. K., Gutierrez, T., Yang, X. J., Cai, C., Yang, Z., & Coulon, F. (2021). Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: Remediation strategies and future perspectives. *Science of the Total Environment, 767:* 1–25. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144351

Aragon-Briceño, C. I., Pozarlik, A. K., Bramer, E. A., Niedzwiecki, L., Pawlak-Kruczek, H., & Brem, G. (2021). Hydrothermal carbonization of wet biomass from nitrogen and phosphorus approach: A review. *Renewable Energy*, *171*: 201–415. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.109

Arif, M., Liu, G., Yousaf, B., Ahmed, R., Irshad, S., Ashraf, A., Zia-ur-Rehman, M., & Rashid, M. S. (2021). Synthesis, characteristics and mechanistic insight into the clays and clay minerals-biochar surface interactions for contaminants removal-A review. *Journal of Cleaner Production*, *310*: 127548. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127548

Azeem, M., Hassan, T. U., Tahir, M. I., Ali, A., Jeyasundar, P. G. S. A., Hussain, Q., Bashir, S., Mehmood, S., & Zhang, Z. (2021). Tea leaves biochar as a carrier of Bacillus cereus improves the soil function and crop productivity. *Applied Soil Ecology*, *157*: 1–13. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103732

Benaimeche, O., Seghir, N. T., Sadowski, Ł., & Mellas, M. (2020). The Utilization of Vegetable Fibers in Cementitious Materials. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 2*: 649–662. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-

803581-8.11596-6

Bimová, P., Roupcová, P., Klouda, K., Matejová, L., Stanová, A. V., Grabicová, K., Grabic, R., Majová, V., Híveš, J., Špalková, V., Gemeiner, P., Celec, P., Konecná, B., Bírošová, L., Krahulcová, M., & Mackulak, T. (2021). Biochar - An efficient sorption material for the removal of pharmaceutically active compounds, DNA and RNA fragments from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(4): 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105746

Braga, R. M., Melo, D. M. A., Aquino, F. M., Freitas, J. C. O., Melo, M. A. F., Barros, J. M. F., & Fontes, M. S. B. (2014). Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *115*(2): 1915–1920. https://doi.org/10.1007/s10973-013-3503-7

Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L. E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C. A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, *66*: 176–185. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059

Bruckman, V. J., & Pumpanen, J. (2019). Biochar use in global forests: opportunities and challenges. In *Developments in Soil Science*: 427–453. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63998-1.00017-3

Calderón, H. A. (2020). Microscopía electrónica de transmisión para observar átomos: principios y desarrollo. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, *13*(25): 133–156. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.25.69649

Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *40*: 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002

Cheng, S., Liu, Y., Xing, B., Qin, X., Zhang, C., & Xia, H. (2021). Lead and cadmium clean

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

removal from wastewater by sustainable biochar derived from poplar saw dust. *Journal of Cleaner Production*, *314:* 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128074

Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003). The Iron Oxides. In *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. Wiley-VCH. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=dlMuE3_klW4C&oi=fnd&pg=PA1&ots=l1hQUhW_gJ&sig=2LKf3DA6djJITHTqkvpP4ZK02II&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2019). Pyrolysis of Biomass. In *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*: 217–244. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00009-9

Díaz Batalla, M., Gonzales Asencios, A., Sifuentes Yepes, D., & Gonzales Mora, E. (2010). El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos. *Xilema*, *23*(1): 95–103.

Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil. *Terra Latinoamericana*, *34*: 367–382. http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf

Fang, Q., Ye, S., Yang, H., Yang, K., Zhou, J., Gao, Y., Lin, Q., Tan, X., & Yang, Z. (2021). Application of layered double hydroxide-biochar composites in wastewater treatment: Recent trends, modification strategies, and outlook. *Journal of Hazardous Materials*, *420*: 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126569

Fang, Z., Gao, Y., Bolan, N., Shaheen, S. M., Xu, S., Wu, X., Xu, X., Hu, H., Lin, J., Zhang, F., Li, J., Rinklebe, J., & Wang, H. (2020). Conversion of biological solid waste to graphene-containing biochar for water remediation: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, *390*: 124611. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.124611

Flaris, V., & Singh, G. (2009). Recent developments in biopolymers. *Journal of Vinyl and*

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Additive Technology, *15*(1): 1–11. https://doi.org/10.1002/VNL.20171

Ghodake, G. S., Shinde, S. K., Kadam, A. A., Saratale, R. G., Saratale, G. D., Kumar, M., Palem, R. R., AL-Shwaiman, H. A., Elgorban, A. M., Syed, A., & Kim, D. Y. (2021). Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, *297*: 1–38. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126645

Gope, M., & Saha, R. (2021). Removal of heavy metals from industrial effluents by using biochar. In *Intelligent Environmental Data Monitoring for Pollution Management*: 25–48. Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819671-7.00002-6

Guo, Y., & Rockstraw, D. A. (2007). Physicochemical properties of carbons prepared from pecan shell by phosphoric acid activation. *Bioresource Technology*, *98*(8): 1513–1521. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.027

Haris, M., Hamid, Y., Usman, M., Wang, L., Saleem, A., Su, F., Guo, J. K., & Li, Y. (2021). Crop-residues derived biochar: Synthesis, properties, characterization and application for the removal of trace elements in soils. *Journal of Hazardous Materials*, *416*: 1–21. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126212

Huang, J., & Best, S. (2014). Ceramic biomaterials for tissue engineering. In *Tissue Engineering Using Ceramics and Polymers*, *2*: 3 - 34. https://doi.org/10.1533/9780857097163.1.3

Huang, W. H., Lee, D. J., & Huang, C. (2021). Modification on biochars for applications: A research update. *Bioresource Technology*, *319*: 1–11. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124100

IBI. (2013). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil. *International Biochar Initiative*, *April*: 1–48. http://www.biochar-international.org/characterizationstandard

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Igalavithana, A. D., Mandal, S., Niazi, N. K., Vithanage, M., Parikh, S. J., Mukome, F. N. D., Rizwan, M., Oleszczuk, P., Al-Wabel, M., Bolan, N., Tsang, D. C. W., Kim, K. H., & Ok, Y. S. (2017). Advances and future directions of biochar characterization methods and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *47*(23): 2275–2330. https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1421844

Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. In *Chemosphere*, 134: 232–240. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072

Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and Application of Granular Activated Carbon from Biomass Waste Materials for Water Treatment: A Review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *6*(4): 292–322. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.03.003

Kikas, T., Tutt, M., Raud, M., Alaru, M., Lauk, R., & Olt, J. (2016). Basis of energy crop selection for biofuel production: Cellulose vs. lignin. *International Journal of Green Energy*, *13*(1): 49–54. https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909359

Kristanto, J., Azis, M. M., & Purwono, S. (2021). Multi-distribution activation energy model on slow pyrolysis of cellulose and lignin in TGA/DSC. *Heliyon*, *7*(7): 1–8. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07669

Lee, J., Sarmah, A. K., & Kwon, E. E. (2019). Production and Formation of Biochar. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications:* 3–18. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7

Lefebvre, D., Williams, A., Kirk, G. J. D., Meersmans, J., Sohi, S., Goglio, P., & Smith, P. (2021). An anticipatory life cycle assessment of the use of biochar from sugarcane residues as a greenhouse gas removal technology. *Journal of Cleaner Production*, *312:* 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127764

Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

(2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, *763*: 1–18. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204

Lewoyehu, M. (2021). Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *159*: 105279. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105279

Li, X., Zhang, J., Liu, B., & Su, Z. (2021). A critical review on the application and recent developments of post-modified biochar in supercapacitors. *Journal of Cleaner Production*, *310*: 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127428

Li, Y., Gupta, R., Zhang, Q., & You, S. (2023). Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Bioresource Technology*, *369*: 128423. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128423

Lu, B., Guo, H., Li, P., Liu, H., Wei, Y., & Hou, D. (2011). Comparison study on transformation of iron oxyhydroxides: Based on theoretical and experimental data. *Journal of Solid State Chemistry*, *184*(8): 2139–2144. https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.06.008

Ma, Z. W., Liu, H. Q., & Lü, Q. F. (2021). Porous biochar derived from tea saponin for supercapacitor electrode: Effect of preparation technique. *Journal of Energy Storage*, *40:* 1–11. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102773

Maljaee, H., Madadi, R., Paiva, H., Tarelho, L., & Ferreira, V. M. (2021). Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Construction and Building Materials*, *283*: 1–18. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757

Marcińczyk, M., Ok, Y. S., & Oleszczuk, P. (2022). From waste to fertilizer: Nutrient recovery from wastewater by pristine and engineered biochars. *Chemosphere*, *306*: 135310. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135310

Moreno, A., Ríos, J. C., & Flores, S. E. (2021). Carbón activado : generalidades y aplicaciones. *CienciAcierta*, *17*(66): 88–114.

Novak, J. M., & Johnson, M. G. (2018). Elemental and spectroscopic characterization of low-temperature (350°C) lignocellulosic- and manure-based designer biochars and their use as soil amendments. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications:* 37–58. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00003-0

Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., Lu, H., & Khanal, S. K. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, *246:* 110–122. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.122

Pan, X., Gu, Z., Chen, W., & Li, Q. (2021). Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review. In *Science of the Total Environment*, *754*: 1–17. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142104

Pandey, D., Daverey, A., & Arunachalam, K. (2020). Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*, *255*: 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120267

Panwar, N. L., Pawar, A., & Salvi, B. L. (2019). Comprehensive review on production and utilization of biochar. *SN Applied Sciences*, *1*(2): 1–19. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6

Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021a). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *155:* 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081

Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021b). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *155:* 1–14. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Rajec, P., Rosskopfová, O., Galamboš, M., Frišták, V., Soja, G., Dafnomili, A., Noli, F., Đukić, A., & Matović, L. (2016). Sorption and desorption of pertechnetate on biochar under static batch and dynamic conditions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *310*(1): 253–261. https://doi.org/10.1007/s10967-016-4811-8

Restuccia, L., Ferro, G. A., Suarez-Riera, D., Sirico, A., Bernardi, P., Belletti, B., & Malcevschi, A. (2020). Mechanical characterization of different biochar-based cement composites. *Procedia Structural Integrity*, *25:* 226–233. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.027

Roy, D., Kanojia, S., Mukhopadhyay, K., & Eswara Prasad, N. (2021). Analysis of carbon-based nanomaterials using Raman spectroscopy: principles and case studies. *Bulletin of Materials Science*, *44*(1): 1–9. https://doi.org/10.1007/s12034-020-02327-9

S, R., & P, B. (2019). The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application—A review. *Industrial Crops and Products*, *128*: 405–423. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.041

Sahoo, S. S., Vijay, V. K., Chandra, R., & Kumar, H. (2021). Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, *3*: 1–10. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101

Shanmugam, V., Sreenivasan, S. N., Mensah, R. A., Försth, M., Sas, G., Hedenqvist, M. S., Neisiany, R. E., Tu, Y., & Das, O. (2022). A review on combustion and mechanical behaviour of pyrolysis biochar. *Materials Today Communications*, *31*: 103629. https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2022.103629

Shukla, P., Giri, B. S., Mishra, R. K., Pandey, A., & Chaturvedi, P. (2021). Lignocellulosic biomass-based engineered biochar composites: A facile strategy for abatement of emerging pollutants and utilization in industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *152*: 1–20. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111643

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Singh Yadav, S. P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, *11*: 100498. https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100498

Sizmur, T., Fresno, T., Akgül, G., Frost, H., & Moreno-Jiménez, E. (2017). Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water. In *Bioresource Technology*, *246*: 34–47. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.082

Soffian, M. S., Abdul Halim, F. Z., Aziz, F., A. Rahman, M., Mohamed Amin, M. A., & Awang Chee, D. N. (2022). Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment. *Environmental Advances*, *9*: 100259. https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2022.100259

Steiner, C., Bayode, A. O., & Ralebitso-Senior, T. K. (2016). Feedstock and Production Parameters: Effects on Biochar Properties and Microbial Communities. In *Biochar Application: Essential Soil Microbial Ecology*: 41–54. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803433-0.00002-3

Subratti, A., Vidal, J. L., Lalgee, L. J., Kerton, F. M., & Jalsa, N. K. (2021). Preparation and characterization of biochar derived from the fruit seed of Cedrela odorata L and evaluation of its adsorption capacity with methylene blue. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *21:* 1–9. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100421

Tang, B., Xu, H., Song, F., Ge, H., Chen, L., Yue, S., & Yang, W. (2022). Effect of biochar on immobilization remediation of Cd**-**contaminated soil and environmental quality. *Environmental Research, 204*: 1–10. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111840

Tang, J., Zhu, W., Kookana, R., & Katayama, A. (2013). Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *116*(6): 653–659. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.05.035

Tareq, R., Akter, N., & Azam, M. S. (2019). Biochars and Biochar Composites: Low-Cost

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Adsorbents for Environmental Remediation. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*: 169–209. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00010-8

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *19*(1): 191–215. https://doi.org/10.1007/S11157-020-09523-3

Tsechansky, L., & Graber, E. R. (2014). Methodological limitations to determining acidic groups at biochar surfaces via the Boehm titration. *Carbon*, *66*: 730–733. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.044

Velusamy, K., Devanand, J., Senthil Kumar, P., Soundarajan, K., Sivasubramanian, V., Sindhu, J., & Vo, D. V. N. (2021). A review on nano-catalysts and biochar-based catalysts for biofuel production. *Fuel*, *306*: 1–12. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121632

Walther, T. (2017). Transmission Electron Microscopy of Nanostructures. In *Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization*: 105–134. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-46141-2.00004-3

Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, *227*: 1002–1022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282

Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, *62*: 33–86. https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.05.004

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, *217*: 240–261. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

Xie, R., Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, P., & Han, L. (2021). Effects and mechanism of pyrolysis

temperature on physicochemical properties of corn stalk pellet biochar based on combined characterization approach of microcomputed tomography and chemical analysis. *Bioresource Technology*, *329*: 1–9. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124907

Xiong, J., Xu, J., Zhou, M., Zhao, W., Chen, C., Wang, M., Tan, W., & Koopal, L. (2021). Quantitative Characterization of the Site Density and the Charged State of Functional Groups on Biochar. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *9*(6): 2600–2608. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c09051

Xu, H., Cai, A., Wu, D., Liang, G., Xiao, J., Xu, M., Colinet, G., & Zhang, W. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, *213*: 1–10. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105125

Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, *28*: 1–15. https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570

Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S. J., & Saravanan, A. (2019). Advances in production and application of biochar from lignocellulosic feedstocks for remediation of environmental pollutants. *Bioresource Technology*, *292:* 1–11. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122030

Yang, C., Liu, J., & Lu, S. (2021). Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils. *Geoderma*, *397*: 1–11. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115097

Yang, Y., Hobbie, S. E., Hernandez, R. R., Fargione, J., Grodsky, S. M., Tilman, D., Zhu, Y. G., Luo, Y., Smith, T. M., Jungers, J. M., Yang, M., & Chen, W. Q. (2020). Restoring Abandoned Farmland to Mitigate Climate Change on a Full Earth. *One Earth*, *3*(2):

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

176–186. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.019

Yao, Y., Gao, B., Fang, J., Zhang, M., Chen, H., Zhou, Y., Creamer, A. E., Sun, Y., & Yang, L. (2014). Characterization and environmental applications of clay–biochar composites. *Chemical Engineering Journal*, *242:* 136–143. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.12.062

Yin, Y., Yang, C., Li, M., Zheng, Y., Ge, C., Gu, J., Li, H., Duan, M., Wang, X., & Chen, R. (2021). Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: A review. *Science of the Total Environment*, *798:* 1–10. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149294

Yu, J., Paterson, N., Blamey, J., & Millan, M. (2017). Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Fuel*, *191:* 140–149. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.057

Zhang, L., Yang, Z., Li, S., Wang, X., & Lin, R. (2020). Comparative study on the two-step pyrolysis of different lignocellulosic biomass: Effects of components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *152*: 104966. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104966

Zhang, Q., Li, S., Saleem, M., Ali, M. Y., & Xiang, J. (2021). Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Applied Soil Ecology*, *168:* 1–8. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104154

Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B., & Liu, L. (2019). Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy*, *171:* 581–598. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.035

Zhao, L., Sun, Z.-F., Pan, X.-W., Tan, J.-Y., Yang, S.-S., Wu, J.-T., Chen, C., Yuan, Y., & Ren, N.-Q. (2023). Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions. *Water Research X*, *18*: 100167.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 7 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

https://doi.org/10.1016/J.WROA.2023.100167

Zhou, Y., Qin, S., Verma, S., Sar, T., Sarsaiya, S., Ravindran, B., Liu, T., Sindhu, R., Patel, A. K., Binod, P., Varjani, S., Rani Singhnia, R., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2021). Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, *337:* 1–14. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125451

Zoroufchi, K., Motalebi Damuchali, A., Soltan, J., & McPhedran, K. N. (2020). Treatment of aqueous arsenic – A review of biochar modification methods. *Science of the Total Environment*, *739*: 1–20. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139750

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tendencias en el desarrollo de biosensores para el monitoreo de arsénico en agua

Trends in the development of biosensors for monitoring arsenic in water

Carmen Natividad Alvarado Canché,[1] Arxel de León Santillán[2], Roberto Arredondo Valdés[1], Antonio Serguei Ledezma Perez[2], Miguel Ángel de León Zapata[3], Daniel Canseco Caballero[2], Elan Iñaky Laredo Alcalá*[3]

[1] Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila
Blvd. V. Carranza s/n, Col. República Oriente, Saltillo, Coahuila. C.P. 25280.
[2]Centro de Investigación en Química Aplicada.
Blvd. Enrique Reyna Hermosillo No. 140, Saltillo, Coahuila, CP25294.
[3]Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad y Ecología de Coahuila.
Universidad Autónoma de Coahuila, Miguel Hidalgo #212 Zona Centro, Cuatrociénegas Coahuila. C.P. 27640.

***Autor de correspondencia:** Dr. Elan Iñaky Laredo Alcalá
Centro de Investigación para la Conservación de la Biodiversidad y Ecología de Coahuila de la Universidad Autónoma de Coahuila. Tel: 8442181231
Correo electrónico: elan_laredo@uadec.edu.mx ORCID: 0000-0003-0957-787X

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

La contaminación de agua por arsénico representa un riesgo de proporción global debido a su toxicidad y por su clasificación como un elemento carcinogénico y mutagénico. En las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos de determinación de arsénico en agua proporcionando resultados eficientes. El presente artículo de revisión es el estudio de los avances realizados en el desarrollo de biosensores de reconocimiento óptico, electroquímicos y electroquimioluminiscentes para la determinación y cuantificación de arsénico en agua.

Palabras clave: arsénico, biosensores, sistemas ópticos, electroquímica, electroquimioluminiscencia.

Abstract: Arsenic contamination of water represents a risk of global proportion due to its toxicity and its classification as a carcinogenic and mutagenic element. In recent decades, different methods for determining arsenic in water have been developed, providing efficient results. This article reviews the advances made in the study of optical, electrochemical, and electrochemiluminescent recognition biosensors for the determination and quantification of arsenic in water.

Keywords: arsenic, biosensors, optical systems, electrochemistry, electrochemiluminiscence.

1 Introducción

Recientes estudios de la Organización Mundial de la salud informan que aproximadamente mil millones de personas no tienen acceso a agua limpia a consecuencia de esto, aproximadamente 1.6 millones de personas fallecen (Li y col., 2019). La contaminación del agua, particularmente de las aguas subterráneas, se reconoce como una cuestión importante de proporción global, los contaminantes más comunes son los metales pesados (arsénico, cadmio, plomo y mercurio). Debido a su toxicidad, abundancia natural, y no degradabilidad

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

pueden permanecer por años representando una amenaza para la salud humana (Alavanja y col., 2004).

La influencia del arsénico en la actividad humana ha sido amplia a lo largo de la historia, más que cualquier otro elemento o compuesto tóxico. La contaminación del agua por arsénico es causada por una variedad de factores naturales y antropogénicos; por ejemplo, la agricultura, la extracción de minerales, el procesamiento del metal y la actividad industrial (Kamal y Parkpian, 2002).

El arsénico se presenta en diferentes proporciones en los ecosistemas (20 % en corteza terrestre, 14% en agua de mar y 12% en el sistema humano) (Mandal y Suzuki, 2002). Recientemente la Agencia Internacional para la Investigación de Cáncer (IARC) clasificó a este metal como un potencial mutagénico y carcinogénico, por lo cual el monitoreo de arsénico en agua ha cobrado relevancia, propiciando en las últimas cinco décadas el desarrollo de diversas técnicas (Ma y col., 2014). Los biosensores representan una excelente alternativa para la detección de arsénico. En particular, los biosensores basados en elementos de reconocimiento involucran la detección mediante la emisión de luz, generalmente constituidos por una molécula biológica especifica (enzima, célula, anticuerpo, ácido desoxirribonucleico, entre otros), que en ocasiones unida a un transductor electroquímico, óptico o térmico permite la detención de un analito (Khansili y col., 2018). El presente artículo de revisión pretende abordar las diferentes metodologías utilizadas para la detección de arsénico mediante sistemas de biosensores.

2 Determinación de arsénico en agua

El arsénico es el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre, encontrándose en varios estados de oxidación en el medio ambiente (0, +5, y +3) y en aguas naturales en forma de oxianiones inorgánicos como arsenito trivalente (As (III)) o arseniato pentavalente (As (V)). El As (III) está reportado como tóxico debido a su movilidad y a su capacidad para inhibir múltiples proteínas (Devi y col., 2019). La contaminación del agua por arsénico es

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

causada por factores naturales y antropogénicos, incluida la agricultura, la extracción de minerales, el procesamiento de metales y la actividad industrial (Kamal y Parkpian, 2002). En el año 2001 la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que aproximadamente 130 millones de personas en el mundo están expuestas al arsénico; la exposición prolongada a este metal puede ocasionar efectos nocivos a la salud como envenenamiento, daños en la piel, deterioro de órganos internos, problemas neurológicos, además recientemente la IARC lo clasificó como un potencial mutagénico y carcinogénico (Duker y col., 2005). La legislación de la calidad del agua en la agencia de protección ambiental ha sido más estricta reduciendo los niveles máximos permisibles de arsénico en agua potable a unos pocas partes por billón (Choong y col., 2007), por lo cual el monitoreo de arsénico en agua ha cobrado relevancia, propiciando en las últimas cinco décadas el desarrollo de diversas técnicas de detección (Ma y col., 2014).

En la actualidad las técnicas utilizadas para la detección y cuantificación de arsénico en agua se muestran en la Tabla 1, se pueden resumir en técnicas espectrométricas (espectrometría de absorción atómica de llama, generación de hidruros, espectrometría de fluorescencia atómica de generación de hidruros (HG-AAS y HG-AFS) y espectrometría de absorción atómica en horno de grafito (GFAA)), técnicas de plasma acoplado inductivamente (ICP), (ICP-AFS y ICM-espectrometría de masas (MS), cromatografía liquida de alta presión (HPLC y ICP-MS)) y análisis de activación de neutrones (NAA) (Terlecka y col., 2005).

Tabla 1. Técnicas actuales para la detección de arsénico en agua

Técnicas		Ventajas	Desventajas	Bibliografía
Espectrométricas	FAAS HG-AAS HG-AFS GFAA	La inclusión de hidruros aumenta la sensibilidad y reduce las interferencias de la matriz. Permite analizar compuestos no volátiles.	Los metales de transición pueden interferir con la determinación de arsénico. Requiere de técnicas acopladas como HPLC, reduciendo la sensibilidad. Es necesario tratamiento previo de la muestra.	Maher y col., 2015. Llahuilla y col., 2020.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

			Posible pérdida de As (III) durante el ciclo de carga del grafito.	
Técnicas de plasma acoplado inductivamente	ICP-AFS ICM-MS HPLC y ICP-MS	Posee isotopos con capacidad de análisis de alta precisión y detección. Puede determinar especies no volátiles. Menores costos de funcionamiento. Tiempos de calentamiento más cortos previos al análisis.	Interferencia de cloruro de argón. Baja sensibilidad debido a la poca eficiencia de ionización en ICP. Límites de detección bajos.	Martinez y col., 2001. Niedzielsk y col., 2003. Maher y col., 2015. Shchukin y col., 2020.
Análisis de activación de neutrones	NAA	Alta sensibilidad	Interferencia con sal presente en muestras de agua	Niedzielski y Siepak, 2003. Zeisler y col., 2006.

Estos sistemas a pesar de su alta sensibilidad y selectividad no se pueden utilizar en el campo para análisis de rutina, ya que dependen de infraestructura, instrumentación sofisticada y costosa, personal capacitado, productos químicos de alta pureza, consumibles para el tratamiento y pretratamiento de la muestra (Hung y col., 2004), por lo tanto, es necesario el desarrollo de un dispositivo amigable, desplegable en el campo para el monitoreo frecuente e “in situ” de arsénico en agua como lo pueden llegar a ser los biosensores.

3 Biosensores

Los biosensores son dispositivos de detección y cuantificación, generalmente están compuestos por un biocomponente (enzima, célula, anticuerpo, ADN, entre otros), un transductor (electroquímico, óptico o térmico) y un amplificador de unidad (Schöning y col., 2018) como se muestra en la Figura 1. Los sensores utilizan características de etiqueta especializadas como fluorescencia, cambio de coloración o detección de luz para un analito en específico (Samuel y Rao, 2016), la evolución de estos sensores para el análisis en tiempo real con alta especificidad y bajas concentraciones de muestra reduce el costo y desechos del analito.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

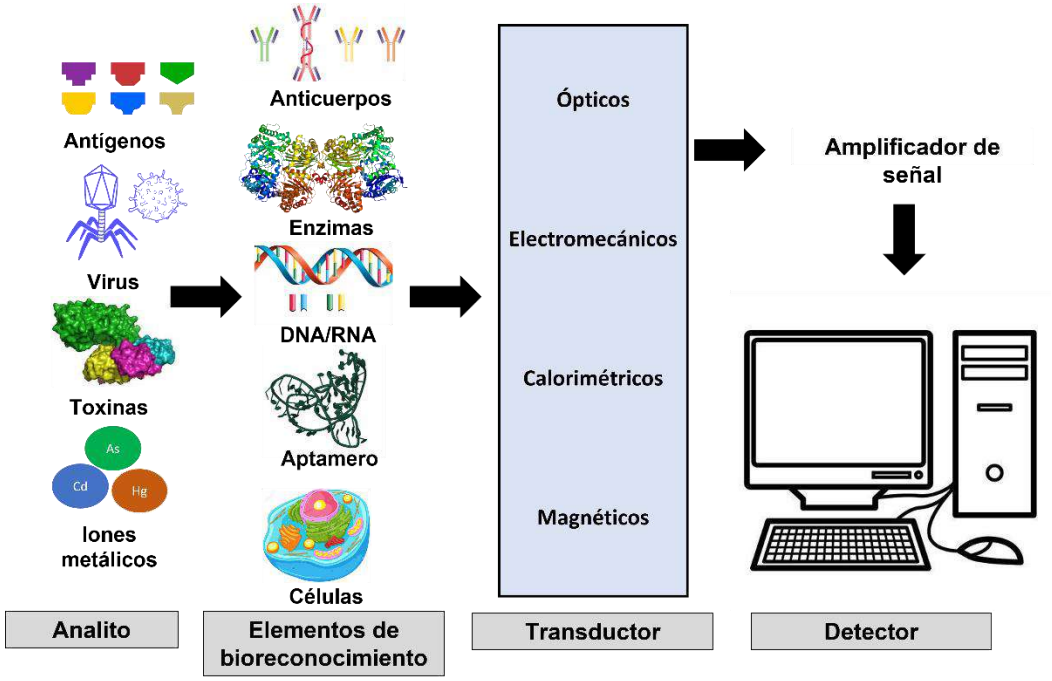


Figura 1. Esquema de un biosensor y sus componentes fundamentales

Los metales pesados, pesticidas, entre otros contaminantes han sido utilizados como objetivo para la construcción y diseño de biosensores (Molina y col., 2019). El analito de interés interactúa con el elemento de bioreconocimiento inhibiendo la actividad metabólica (activada enzimática) o distorsionando la conformación biomolecular (ADN y antígenos). En ambos métodos de trabajo el objetivo es la reducción o la mejora de una señal bioquímica, la cual es reconocida por el biocomponente y convertida por el transductor en una señal medible (Kaur y col., 2015), dependiendo de los tipos de transductor o de la señal transducida, los biosensores se clasifican en dispositivos ópticos, electroquímicos, térmicos y piezoeléctricos.

3.1 Sistemas ópticos

Los sistemas ópticos de detección proporcionan un buen análisis cualitativo, ya que involucran la transducción óptica de uno o múltiples analitos, detectan el cambio en las propiedades de las ondas electromagnéticas y muestran variedad de medidas en espectroscopía por diferentes calidades ópticas, índice de refracción, longitud de onda de

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

absorción, porcentaje de transmisión, intensidad o resonancia (Khansili y col., 2018), interpretando la detección de un analito mediante el cambio en dichas propiedades, estas señales se amplifican, analizan y son convertidas a unidades de concentración.

Los biosensores ópticos más comunes son los basados en resonancia de plasmones superficiales, fluorescencia, quimioluminiscencia y electroquimioluminiscencia.

3.2 Electroquímicos

Los biosensores electroquímicos ofrecen perspectivas novedosas con beneficios como sensibilidad, selectividad, respuestas rápidas, además de ser considerados fiables y fáciles de usar por que utilizan menos reactivos, procedimientos simples y de bajo costo (Zaib y col., 2015).

El biosensor electroquímico genera una señal eléctrica cuando los analitos interactúan con las biomoléculas para producir sustancias químicas, estos generan cambios en el área químicamente activa de los electrodos por presencia de una sonda electroquímica.

En métodos electroquímicos son utilizados la voltametría de barrido lineal en el punto de suspensión, es el método más antiguo para la determinación de trazas de metales inorgánicos, este método posee bajos límites de detección debido a las corrientes capacitivas y la técnica polarografía de pulso diferencial (DPP) tiene los mismos beneficios de selectividad, pero corrientes capacitivas más bajas lo que resulta en límites de detección más bajos, sin embargo, existen pocos trabajos relacionados con la determinación de arsénico en agua usando polarografía de pulso diferencial debido, principalmente, a la sensibilidad limitada (Hung y col., 2004)

3.3 Electroquimioluminiscencia

La electroquimioluminiscencia o quimioluminiscencia electro generada (ECL) es la técnica en la que se emite quimioluminiscencia mediante una reacción de transferencia de electrones (Figura 2) es versátil porque permite ajustar los parámetros durante su fabricación (potencial

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

de corriente, tiempo de reacción y tamaño del electrodo). La ECL es de fácil generación en soluciones acuosas simples y ambientalmente seguras a través de una ruta de co-reactivo, es aplicable a ensayos para diferentes propósitos. Generalmente la ECL es utilizada para identificar co-reactivos potenciadores y extintores de ECL, gracias a su alta sensibilidad, amplio rango lineal y análisis rápido son utilizados en la detección de biomoléculas, alimentos, diagnóstico clínico y análisis de seguimiento ambiental. En la última década se han visto adaptaciones incorporadas en la fabricación de sensores de ECL y adaptaciones a otras técnicas analíticas como inyección de flujo, cromatografía líquida de alta resolución, electroforesis capilar entre otras (Cui y col., 2016, Yao y col., 2017.)

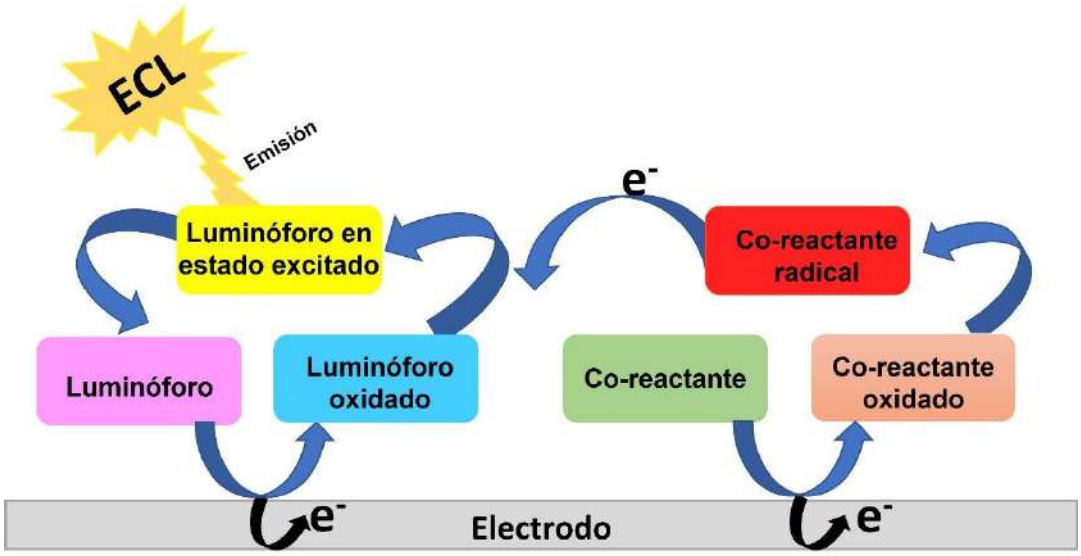


Figura 2. Mecanismo ECL y su generación en un electrodo en presencia de luminóforo y co-reactivo.

Hoy en día se han realizado diferentes publicaciones de biosensores utilizados para la detección de arsénico en agua, como Cosnier y colaboradores en el 2006 determinaron As (V) por medio de un biosensor ácido fosfatasa-polifenol oxidasa, basado en el atrapamiento simultaneo de fosfatasa ácida (PAc) y polifenol oxidasa (PFO) en arcillas aniónicas para la detección de As (V). El principio del funcionamiento consiste en la hidrolisis sucesiva del fenil fosfato en fenol por PAc, seguida de la oxidación de fenol en o-quinona por PFO, se

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

monitoreo la concentración de fenilo potenciando el biosensor para detectar amperométricamente la quinona generada. La detección de As se basó en su efecto inhibitorio sobre la actividad de PAc hacia la hidrolisis de fenil fosfato en fenol (Cosnier y col., 2006). Así mismo utilizando una enzima en el año 2007 Male y colaboradores desarrollaron un biosensor para la detección de As (III). La enzima oxidasa en presencia de molibdeno preparada con quimiolitoautótrofos NT-26 logró la oxidación de arsenito a arseniato. La enzima fue depositada durante 10 minutos a 10 mA en la superficie activa de un electrodo de carbono modificado, el biosensor permitió la transferencia directa de electrones, efectuando la reducción y la reoxidación de la enzima sin un mediador artificial de transferencia de electrones, fue utilizado para análisis de arsenito en agua de grifo, de rio y mineral comercial mostrando una excelente reproducibilidad (Male y col., 2007).

Yang y colaboradores en el 2012 estudiaron la absorción de As (III) y As (V) por medio de la bacteria *Bacillus subtilis*. La incubación de las bacterias con Fe (III) causa la absorción de hierro y parte del hierro se adhiere a la membrana celular como oxido férrico hidratado (OFH). A pH 8 la capacidad de unión de As por mol de hierro para las bacterias ferradas es mayor que la reportada para cualquier absorbente que contenga hierro (Yang y col., 2012). Liang y colaboradores en el año 2018 construyeron un indicador radiométrico de electroquimioluminiscencia para la detección de ultratrazas de As (III) basado en la extinción sinérgica de la emisión de ECL de Au-gC_3N_4NSs utilizando AS (III) y Rutenio (Ru (bpy)$_3$ $^{2+}$), generando una nueva señal de ECL de Ru (bpy)$_3$ $^{2+}$ con una mayor intensidad, logrando la detección de As (III) con buena sensibilidad y selectividad (Liang y col., 2018). Mejía Segovia en 2018 elaboró un biosensor para la detección de As utilizando la bacteria *Escherichia coli* modificada con un plásmido pTOP Blunt V2, para la realización del plásmido fueron sintetizados los genes de luminiscencia y de resistencia de As, utilizaron la técnica de electroporación para la transformación y recombinación de las células, las cuales fueron sometidas a impulsos eléctricos controlados y posterior a ello se cultivaron en agar LB, se sometieron a pruebas de tolerancia de arsénico determinando la absorbancia del arsénico por espectrofotómetro de microplacas y espectroscopia de absorción atómica

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

(EAA), obteniendo un biosensor competente para medir concentraciones de As de 0.01 a 0.08 ppm (Mejía Segovia, 2018) y Xi y colaboradores en 2020 fabricaron un sensor ECL sin inmovilización y sin etiquetas, integrando un primer y una plantilla para el diseño de un ADN de horquilla, utilizando nanoesferas de polidopamina (PDANS) como inhibidor reversible no especifico. Sin As (III), el ADN en horquilla está restringido por PDANS y se inhibe el proceso SDA $Ru(phen)_3^{2}+$, como sonda ECL, puede difundirse a la superficie del electrodo ITO con carga negativa para brindar una fuerte respuesta ECL. Mientras que la presencia de As (III) libera el ADN en horquilla y desencadena el proceso SDA con la ayuda de la polimerasa y la endonucleasa generando dsDNA, interactúa con $Ru\ (fen)_3^{2+}$ para formar el complejo de dsDNA-$Ru\ (fen)_3^{2+}$. Es difícil acercarse al complejo a la superficie del electrodo ITO debido a la repulsión electrostática, lo que da como resultado una respuesta ECL baja. Obteniendo límites de detección de $1.2x10^{-3}$ppb (Zhu y col., 2020)

La utilización de biosensores para la detección de arsénico en agua actualmente se encuentra en desarrollo, sin embargo, los biosensores podrían cumplir con los criterios de medición precisa, económica y rápida para la detección de este y otros contaminantes que tengan capacidad de análisis “in situ”, estos dispositivos de detección contribuyen para encontrar estrategias que superen las limitaciones de las técnicas analíticas actualmente utilizadas.

4 Conclusiones y perspectivas futuras

El desempeño de cualquier plataforma de detección es dependiente de las características de la sonda para alcanzar la sensibilidad, selectividad, reproducibilidad, límite de detección y la estabilidad deseada. El tipo de sistema y el material utilizado determina si el biosensor puede ser un dispositivo aceptable de campo. Dado que el análisis de especies químicas tiene como objetivo determinar la concentración de un elemento en su estado original en la muestra; el análisis “in situ” podría ser la mejor opción para la determinación de arsénico. Los trabajos comparados de detección de arsénico en agua por medio de biosensores proporcionan datos cuantitativos confiables que compiten con los métodos convencionales, además de tener como ventaja el costo, rápido tiempo del análisis y menor pretratamiento de la muestra.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Por lo tanto, la investigación sobre el desarrollo de biosensores para detección de cualquier especie química que tenga capacidad de traducción de campo habilitará a la comunidad científica e investigadores para encontrar estrategias que superen las limitaciones de las tecnológicas asociadas.

5 Agradecimientos

Agradecemos al proyecto del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) "Desarrollo de biosensores electroquimioluminiscentes para la determinación de glifosato en la agricultura" numero 315866 por el financiamiento.

6 Referencias

Alavanja, M. C., Hoppin, J. A., & Kamel, F. (2004). Health effects of chronic pesticide exposure: cancer and neurotoxicity. *Annual review of public health*, *25*: 155.

Choong, T. S. Y., Chuah, T. G., Robiah, Y., Gregory Koay, F. L., & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, *217*(1):139–166. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.015

Cosnier, S., Mousty, C., Cui, X., Yang, X., & Dong, S. (2006). Specific Determination of As (V) by an Acid Phosphatase−Polyphenol Oxidase Biosensor. *Analytical Chemistry*, *78*(14): 4985–4989. https://doi.org/10.1021/ac060064d

Cui, H., Paolucci, F., Sojic, N., & Xu, G. (2016). Analytical electrochemiluminescence. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *408*(25): 7001–7002. https://doi.org/10.1007/s00216-016-9837-9

Devi, P., Thakur, A., Lai, R. Y., Saini, S., Jain, R., & Kumar, P. (2019). Progress in the materials for optical detection of arsenic in water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*: *110*; 97–115. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.008

Duker, A. A., Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2005). Arsenic geochemistry and health. *Environment International*, *31*(5): 631–641. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.10.020

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Hung, D. Q., Nekrassova, O., & Compton, R. G. (2004). Analytical methods for inorganic arsenic in water: a review. *Talanta*, *64*(2): 269–277. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.01.027

Kamal, A. S. M., & Parkpian, P. (2002). Arsenic contamination in Hizla, Bangladesh: sources, effects and remedies. *Sci. Asia*, *28*: 181-189.

Kaur, H., Kumar, R., Babu, J. N., & Mittal, S. (2015). Advances in arsenic biosensor development – A comprehensive review. *Biosensors and Bioelectronics*, *63*: 533–545. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.08.003

Khansili, N., Rattu, G., & Krishna, P. M. (2018). Label-free optical biosensors for food and biological sensor applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *265*: 35–49. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.004

Llahuilla Q., J. A., Laguna G., L. S., & Ricaldi C., E. D. (2020). Determinación de arsénico y plomo en lápices labiales mediante espectroscopia de absorción atómica que se expende en Lima Metropolitana. *Ciencia E Investigación*, *23*(2): 35–39. https://doi.org/10.15381/ci.v23i2.19379

Li, Y., Zhou, Q., Ren, B., Luo, J., Yuan, J., Ding, X., Bian, H., & Yao, X. (2020). Trends and Health Risks of Dissolved Heavy Metal Pollution in Global River and Lake Water from 1970 to 2017. In P. de Voogt (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 251*: 1–24. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/398_2019_27

Liang, R. P., Yu, L. D., Tong, Y. J., Wen, S. H., Cao, S. P., & Qiu, J. D. (2018). An ultratrace assay of arsenite based on the synergistic quenching effect of Ru (bpy) 3 2+ and arsenite on the electrochemiluminescence of Au–gC 3 N 4 nanosheets. *Chemical communications*, *54*(99), 14001-14004.doi: 10.1039/c8cc08353c. PMID: 30483680.

Ma, J., Sengupta, M. K., Yuan, D., & Dasgupta, P. K. (2014). Speciation and detection of arsenic in aqueous samples: A review of recent progress in non-atomic spectrometric methods. *Analytica Chimica Acta*, *831*: 1–23. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.04.029

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Maher, W. A., Ellwood, M. J., Krikowa, F., Raber, G., & Foster, S. (2015). Measurement of arsenic species in environmental, biological fluids and food samples by HPLC-ICPMS and HPLC-HG-AFS. *J. Anal. At. Spectrom.*, *30*(10): 2129–2183. https://doi.org/10.1039/C5JA00155B

Male, K. B., Hrapovic, S., Santini, J. M., & Luong, J. H. T. (2007). Biosensor for Arsenite Using Arsenite Oxidase and Multiwalled Carbon Nanotube Modified Electrodes. *Analytical Chemistry*, *79*(20): 7831–7837. https://doi.org/10.1021/ac070766i

Mandal, B. K., & Suzuki, K. T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, *58*(1): 201–235. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0

Martinez-Bravo, Y., Roig-Navarro, A. F., Lopez, F. J., & Hernandez, F. (2001). Multielemental Determination of Arsenic, Selenium and Chromium (VI) Species in Water by HPLC ICP MS. *Journal of Chromatography A*, *926*(2): 265-274.

Mejía Segovia, E. V. (2018). *Construcción del biosensor para detectar arsénico en agua por aplicación tecnológica de la PUCE-SI* (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra).

Molina, M. del C., Bautista, L. F., Belda, I., Carmona, M., Díaz, E., Durante-Rodríguez, G., García-Salgado, S., López-Asensio, J., Martínez-Hidalgo, P., Quijano, M. Á., White, J. F., & González-Benítez, N. (2019). Bioremediation of Soil Contaminated with Arsenic. In A. Kumar & S. Sharma (Eds.), *Microbes and Enzymes in Soil Health and Bioremediation*: 321–351. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9117-0_14

Niedzielski, P., Siepak, M., (2003) Analytical Methods for Determining Arsenic, Antimony and Selenium in Environmental Samples. *Polish Journal of Environmental Studies*, *12*(6): 653–667. http://www.pjoes.com/Analytical-Methods-for-Determining-Arsenic-r-nAntimony-and-Selenium-in-Environmental,87604,0,2.html

Samuel, V. R., & Rao, K. J. (2022). A review on label free biosensors. *Biosensors and Bioelectronics: X*, *11*, 100-216. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100216

Shchukin, V. M., Zhigilei, E. S., Erina, A. A., Shvetsova, Yu. N., Kuz'mina, N. E., & Luttseva, A. I. (2020). Validation of an ICP-MS Method for the Determination of Mercury, Lead, Cadmium, and Arsenic in Medicinal Plants and Related Drug Preparations.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Pharmaceutical Chemistry Journal, *54*(9): 968–976. https://doi.org/10.1007/s11094-020-02306-8

Schöning, M. J., & Poghossian, A Label-Free Biosensing: Advanced Materials, Devices and Applications, Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors (2018) 16: 1–26 DOI 10.1007/5346_2017_2

Terlecka, E. (2005). Arsenic Speciation Analysis in Water Samples: A Review of The Hyphenated Techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, *107*(1): 259–284. https://doi.org/10.1007/s10661-005-3109-z

Zhu, X., Zhang, S., Li, W., Zhan, Y., Yu, L., Wu, X., ... & Yang, G. (2020). Label-free and immobilization-free electrochemiluminescent sensing platform for highly sensitive detection of As (III) by combining target-induced strand displacement amplification with polydopamine nanospheres. *Sensors and Actuators b: Chemical*, *311*:2-4. https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.127818

Yang, T., Chen, M.-L., Liu, L.-H., Wang, J.-H., & Dasgupta, P. K. (2012). Iron(III) Modification of Bacillus subtilis Membranes Provides Record Sorption Capacity for Arsenic and Endows Unusual Selectivity for As(V). *Environmental Science & Technology*, *46*(4): 2251–2256. https://doi.org/10.1021/es204034z

Yao, J., Li, L., Li, P., & Yang, M. (2017). Quantum dots: from fluorescence to chemiluminescence, bioluminescence, electrochemiluminescence, and electrochemistry. *Nanoscale*, *9*(36), 13364-13383. https://doi.org/10.1039/C7NR05233B
Yogarajah, N., & Tsai, S. S. H. (2015). Detection of trace arsenic in drinking water: challenges and opportunities for microfluidics. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, *1*(4): 426–447. https://doi.org/10.1039/C5EW00099H

Zaib, M., Athar, M. M., Saeed, A., & Farooq, U. (2015). Electrochemical determination of inorganic mercury and arsenic—A review. *Biosensors and Bioelectronics*, *74*: 895–908. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.07.058

Zeisler, R., Mackey, E. A., Lamaze, G. P., Stover, T. E., Oflaz Spatz, R., & Greenberg, R. R. (2006). NAA methods for determination of nanogram amounts of arsenic in biological samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *269*(2): 291–296. https://doi.org/10.1007/s10967-006-0381-5

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 19 de diciembre de 2022
Artículo aceptado 22 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

La asignatura de “ciudadanía” en el currículo de la Universidad Autónoma de Coahuila como acicate para la formación de virtudes cívicas en los estudiantes de educación media y superior.

The course of "citizenship" in the curriculum of the Autonomous University of Coahuila as an spur for the training of civic virtues in middle and higher education students.

Samuel Cepeda Tovar[** 1], Miguel Ángel Quirarte Lugo [2]

[1]Escuela de Bachilleres Dr. Y Gral. Jaime Lozano Benavides UN. C. Ocampo y Nogalar 1205 Nte., Col. Centro, Allende, Coahuila. Tel. 8626211663.

[2]Universidad Autónoma del Noreste (UANE). Arq. Germán Robles Gil Maza #310. Fracc. San Felipe Sur, CP 26070. Piedras Negras, Coah. Tel. 8787826310.

*Autor para correspondencia: s.cepeda@uadec.edu.mx

ORCID: 0000-0002-0228-2908.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen.

La Universidad Autónoma de Coahuila ha puesto en marcha de manera institucional la asignatura de CIUDADANÍA dentro del currículo de la Educación media y superior; lo cual sin duda es un gran avance en la formación de auténticos ciudadanos participativos que nuestro país requiere con urgencia; ciudadanos formados en virtudes cívicas y conocimientos sobre mecanismos que les permitan realmente incidir en el diseño, ejecución y evaluación de políticas públicas en cualquiera de los tres ámbitos de gobierno, sin embargo, el esfuerzo aún no es suficiente, pues nos enfrentamos a dos grandes retos: el primero es la resistencia de la planta docente de las diversas escuelas a la capacitación adecuada en los contenidos temáticos de esta materia, y en segundo lugar a la necesidad de implementar una política transversal que inmiscuya a la mayoría de las asignaturas en la formación de ciudadanos, pues la responsabilidad de la formación cívica no puede recaer en una sola asignatura y un solo profesor por institución. Sobre estos retos disertaremos en las siguientes líneas.

Palabras clave: Transversalidad, currículum, ciudadanía, mecanismos de participación ciudadana.

Abstract.

The Autonomous University of Coahuila has institutionally launched the course of CITIZENSHIP within the core curriculum of upper secondary education and university; which is certainly a great advance in the development of authentic participatory citizens that our country urgently requires; qualified citizens in civic virtues and knowledge about mechanisms that allow them to really influence the design, performance and evaluation of public policies in any of the three areas of government, however, the effort is still not enough, since we are facing two great challenges: the first is the resistance of the teaching staff of several schools to adequate training in course content, in the second place the requirement to implement a transversal policy that involves most of the courses in the guidance of citizens, since the responsibility of civic education may not fall on a single course and a single teacher per institution. We will discuss these challenges in the following lines.

Keywords: Transversely, core curriculum, citizenship, citizen participation mechanisms.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

Introducción

Hablar de ciudadanía en México es circunscribirse a cuestiones formales y legales, tales como los aspectos constitucionales contenidos en los artículos 34, 35 y 36 de nuestra carta magna que hacen referencia a las obligaciones de los ciudadanos, sin embargo, el contenido del concepto va mucho más allá de requisitos legales, alude a una serie de virtudes cívicas, axiológicas y cognitivas. Cívicas en referencia a la teoría de Victoria Camps en que señala la alfabetización política que abarca el conocimiento de sus derechos humanos y ciudadanos, así como el conocimiento de instituciones democráticas, y la convivencia o cultura de la paz como virtudes de un ciudadano. Axiológicas referentes a valores como la tolerancia, la solidaridad, el respeto y empatía y, finalmente, cognitivas que son relativas al conocimiento de los diversos mecanismos de participación ciudadana que existen y permiten la gobernanza o relación directa entre sociedad y gobierno para el diseño, implementación y evaluación de las políticas públicas en los tres ámbitos de gobierno.

En otro sentido, la ciudadanía se ha ligado en la historia reciente a la democracia electoral relacionada directamente con los índices de participación ciudadana en cada elección constitucional, sin embargo, esta visión reduccionista también ha generado que la ciudadanía se conciba como un aspecto periódico cuando, alterno a la elección de representantes, existen otros dispositivos institucionales como la consulta popular o revocación de mandato que también requieren del sufragio ciudadano. En resumidas cuentas, el enfoque que históricamente se le ha dado a la ciudadanía en México ha sido muy laxo y poco pragmático para volver a las personas auténticas ciudadanas y ciudadanos dentro de un sistema democrático limitado como el nuestro.

La evolución del concepto de ciudadanía, a decir de Maiztegui y Eizaguirre (2008) ha sufrido una gran transformación, se da una amplia coincidencia en el reconocimiento de que este campo está configurando una nueva visión de la educación que representa un profundo cambio en la cultura política. Por su parte, el consejo de Europa define a la educación para la ciudadanía democrática como una herramienta que tiene por objetivo "capacitar al ciudadano para jugar un papel activo en la vida pública y para compartir de forma responsable su propio destino y el de su sociedad, anima a establecer una cultura de los derechos humanos que garantice el pleno respeto de estos derechos y la comprensión de las responsabilidades que de ellos se deducen, prepara a las personas para vivir en una sociedad multicultural y para actuar frente a la diferencia con conocimientos, sensibilidad, tolerancia y moral" (Council of Europe, 1999, citado en Maiztegui y Eizaguirre, 2008).

Desarrollo

Por lo tanto, atendiendo a lo anteriormente citado, los centros educativos deben fomentar aprendizajes útiles que tengan aplicación por parte de los alumnos en sus

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

comunidades o contextos en que se desenvuelven; por ello, la formación de competencias y valores cívicos debe ser una prioridad como política educativa en los centros escolares.

Al respecto, Balderas (2018), asegura que la falta de participación ciudadana radica en la total ausencia de un programa transversal de ciudadanía en la escuela y en las universidades, pues los ciudadanos, dice el autor, no surgen por generación espontánea, sino que surgen de los procesos *educativos serios, formales e intencionales*. Es decir, estos procesos intencionales de formación ciudadana deben estar orientados a la formación de competencias y valores muy particulares y al mismo tiempo transversalizar a lo largo de la malla curricular estos procesos de manera formal para realmente formar ciudadanos con las virtudes antes mencionadas.

En lo personal, como docente y exdirectivo en una escuela de bachilleres de la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC) puedo asegurar que hasta hace no más de dos años los planes rectores de la universidad como lo son el Modelo Educativo y el Plan de Desarrollo Institucional no establecían directrices formativas de ciudadanos participativos en sus planes y objetivos. No obstante, en el Nuevo Modelo Educativo y Reforma Académica Universitaria, se señala la formación de ciudadanas y ciudadanos comprometidos "*que hagan suyos los valores que la institución promueve y que se asuman como agentes de cambio que tienen un compromiso con la sociedad y los derechos humanos. Es de vital importancia que refuercen el compromiso con su entidad y su región, que aprendan sobre su entorno y busquen cómo contribuir a construir mejores espacios comunes*" (RAU, 2021).

Esta formación a la que alude la Reforma Académica Universitaria es un tanto genérica y no especifica "el cómo" o las estrategias para que las y los alumnos se asuma como agentes de cambio y manifiesten su compromiso con la sociedad y los derechos humanos, no obstante, la implementación de la nueva asignatura de "ciudadanía" y su contenido orientado en parte hacia los derechos humanos sería la manifestación práctica de ese postulado del nuevo modelo educativo, sin embargo, hay problemas con respecto a esta nueva asignatura y sus contenidos, pues solamente se capacitó en primera instancia a docentes de tres escuelas que de manera "voluntaria" decidieron atender la invitación, el resto de los 14 bachilleratos implementaron la materia inicialmente atendiendo el programa sin capacitación ni perfiles docentes específicos.

Finalmente, en lo que respecta a esta nueva asignatura, además de la deficiente capacitación de los docentes que la han comenzado a impartir a partir del semestre enero-junio 2022, la realidad es que parece ser un esfuerzo aislado que requiere una visión transversal; Botero (2008) nos dice que los ejes transversales tienen un carácter globalizante porque atraviesan, vinculan y conectan muchas asignaturas del currículo, lo cual significan que se convierten en instrumentos que recorren asignaturas y temas y cumplen el objetivo de tener visión de conjunto. También nos dice que es necesario acompañar a estos ejes de

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

metodologías, acciones y estrategias que los conviertan en instrumentos útiles y operativos (p.2).

La implementación de esta nueva asignatura es un gran paso, aunque el esfuerzo es insuficiente, pues no se puede monopolizar en un docente y en una sola asignatura de tiempo limitado a un semestre la formación de competencias y virtudes que sin duda requiere de un esfuerzo formativo colectivo, mismo que definitivamente tampoco se contempla, pues la educación transversal es un tema que ha sido entregado a cada escuela para que decidan cuál clasificación utilizar de manera semestral, lo que también resulta insuficiente, ya que en un semestre no hay tiempo para hablar de transversalidad, pues este tópico se relaciona con la participación no solo de la mayoría de las asignaturas de la malla curricular, sino de la misión y visión de la institución y de los planes y programas académicos anuales de la misma escuela, por lo cual, debe ser holística y generacional.

Por ello, es importante que, desde la educación media superior (EMS), se comience a construir ciudadanía participativa que vaya más allá de programas coyunturales de limpieza de plazas públicas o asistencia a personas vulnerables, que generalmente son las áreas de acción del servicio social, y que se sienten las bases curriculares para la formación de un ciudadano que se inmiscuya en los asuntos públicos que tienen relación directa con su entorno inmediato.

Volviendo a nuestra realidad universitaria; las autoridades han tomado en serio la propuesta de la creación de la materia llamada "ciudadanía", misma que ya se ha construido y puesto en marcha a partir del semestre agosto-diciembre 2022; sin embargo, no se contempla la transversalidad, tampoco se capacitaron a la totalidad de los docentes y por lo tanto no hay criterios generalizados sobre metodologías de aprendizaje, instrumentos de evaluación, bibliografía, etc. Y es que la formación integral requiere de una estrategia a largo plazo que solo la transversalidad puede brindar, sin embargo, se trata de un reto bastante complejo.

La asignatura de "ciudadanía" está, pues, dividida en cuatro módulos:

I. Derechos Humanos en un mundo globalizado;
II. Democracia, libertad y participación ciudadana;
III. Cultura de la paz
IV. Identidad, pertenencia y diversidad.

Dichos módulos son pertinentes y acordes a las necesidades que tiene los estudiantes para construir competencias ciudadanas, en primer lugar cada ciudadano debe conocer cuáles son sus derechos humanos, cómo promoverlos y cómo solicitar la protección de los mismos, esto se enseña a los estudiantes en este primer módulo, en el segundo, además de la teoría sobre la democracia a los estudiantes se les enseña la importancia y la práctica de mecanismos

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

como el acceso a la información, las iniciativas ciudadanas, mecanismos como la consulta popular, la revocación de mandato, plebiscito y referendo como herramientas para poder incidir de manera directa en su entorno como actor principal y no solo como espectador. Enseguida, en el módulo tres se abordan estrategias para resolver conflictos de manera pacífica evitando la violencia, estrategias como la negociación y la mediación y, finalmente, el importante tema del género y el respeto a la diversidad sexual que son temas que siguen siendo semillas de violencia y discriminación contra mujeres y minorías LGBTI.

Los temas son apropiados y necesarios, sin embargo, como materia aislada y circunscrita a un horario y docente determinado (y sin capacitación uniforme) vuelve aislado el esfuerzo, por ello la transversalidad se vuelve necesaria y me atrevo a señalar que esta asignatura es una de las más importantes del bachillerato, porque toda persona sin duda alguna desempeñará en la vida alguna función profesional o laboral: médicos, ingenieros, docentes, nutricionistas, abogados, enfermeros, etc., pero el común denominador de todos es la ciudadanía y no la que se obtiene constitucionalmente por la edad, sino la que contiene atributos axiológicos, cognitivos y prácticos que permitan que seamos todos los que colaboremos en la construcción de una mejor sociedad a través de nuestra participación ya sea vigilando el correcto funcionamiento del gobierno, proponiendo mejoras a nuestro entorno, protegiendo nuestros derechos del abuso de autoridades, respetando la diversidad y trabajando en la construcción de sociedad pacíficas, por ello al necesidad de la transversalización de las competencias y virtudes cívicas.

En cuanto a la participación universitaria, es preciso señalar que dentro de la UAdeC existen consejos directivos en donde los alumnos participan en la toma de decisiones junto a docentes y directores. Así mismo, la reciente reforma a los estatutos universitarios permite la conformación de sociedades de alumnos, e incluso la revocación de mandato con respecto a las y los directores, no obstante, estos instrumentos se derivan de procesos democráticos relacionados con el sufragio, pues para ser electos consejeros los alumnos deben realizar campañas internas mediante planillas y ganar procesos electorales.

Este instrumento (sufragio electoral) lo seguirán usando a lo largo de su vida en el sistema político mexicano, por lo que la sola idea de que los alumnos aprendan a hacer uso correcto de mecanismos como el acceso a la información, les permitirá establecer vigilancia sobre el correcto desempeño de las direcciones de las diversas escuelas y facultades obligando a las mismas a mejorar su desempeño en beneficio directo de los alumnos y de la sociedad en la cual se encuentra inserta la universidad. Situación que actualmente no sucede en las escuelas de la universidad porque la participación se remite casi exclusivamente a cuestiones electorales y prueba de ellos es que la Escuela de Bachilleres Jaime Lozano Benavides es la única escuela certificada en toda la UAdeC por el Institutio Coahuilense de Acceso a la Información (ICAI) como “Escuela promotora de la Transparencia”.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

Las características de un ciudadano participativo son pocas, pero son bastante sustanciales e importantes, las mismas deben ser: ciudadano informado y con conocimientos de la función pública; ciudadano que conozca y sepa hacer uso de los mecanismos de participación ciudadana como el derecho a la información; ciudadano que participe en los canales de participación como foros de consulta u órganos deliberativos y, por último, ciudadano que practique valores tales como la solidaridad y la tolerancia y capaces de presentar iniciativas ciudadanas en sus respectivos municipios para la mejora de su entorno inmediato.

Al respecto, otros subsistemas educativos han hecho muy pocos esfuerzos para generar las características antes mencionadas en estudiantes de educación media superior y para demostrarlo se presentan a continuación el caso de tres mallas curriculares que contienen asignaturas equivalentes a "ciudadanía":

La primera pertenece a la Universidad Autónoma de Sinaloa, que presenta en su bachillerato la asignatura de "ciudadanía y derecho" que como se puede constatar en la imagen siguiente muestra la orientación de la materia hacia la ética, problemas socioeconómicos de México, cultura y sociedad dejando en claro la ausencia de temas como los derechos humanos y los mecanismos de participación ciudadana (Figura 1).

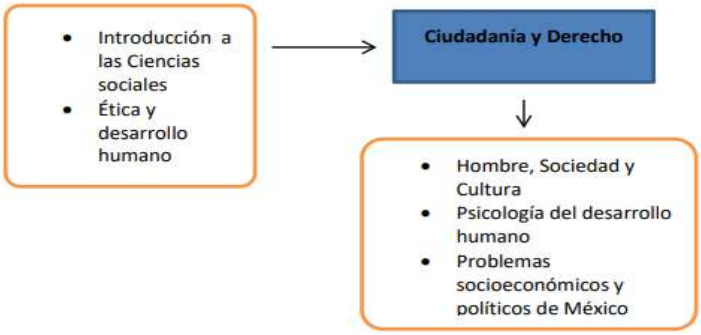


Figura 1. Asignatura Ciudadanía y Derecho. (UAS).
Fuente: Universidad Autónoma de Sinaloa.

Para el caso del CONALEP, la asignatura equivalente denominada "Actuación Ciudadana" basa sus objetivos en que los alumnos aprendan y cumplan los objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (ODS), señalando que: "*Este nuevo marco de desarrollo da una oportunidad para el Sistema de las Naciones Unidas, a nivel mundial y en México, de focalizar nuestra cooperación y programación, de seguir abogando y promoviendo el tema de inclusión y equidad en un marco de derechos, de construir más ciudadanía para las y los mexicanos en este país*."

Es decir, toman los ODS como marco de referencia para contenidos orientados a la formación de ciudadanos. A continuación, se muestra parte de la malla curricular en donde se encuentra la asignatura señalada (Figura 2).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

TRAYECTOS PROPEDÉUTICOS								
	FÍSICO-MATEMÁTICAS	TP1	Análisis de fenómenos eléctricos, electromagnéticos y ópticos	5	Análisis derivativo de funciones	5	Análisis integral de funciones	5
	ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS	TP2	Interpretación de fenómenos microeconómicos	5	Descripción de fenómenos macroeconómicos	5	Cálculo de operaciones financieras de crédito	5
	QUÍMICO-BIOLÓGICAS	TP3	Descripción de la relación entre compuestos orgánicos y el entorno	5	Interpretación de la relación de reacciones metabólicas de los organismos	5	Identificación de la conducta humana	5
	SOCIO-HUMANÍSTICAS	TP4	Interpretación de hechos y fenómenos en estructuras sociales	5	Interpretación y tratamiento de la información	5	Actuación ciudadana	5

Figura 2. Malla curricular CONALEP.
Fuente: CONALEP, Plantel Colima.

Finalmente, el Instituto Nacional de Bellas Artes y Literatura (INBAL), organismo cultural del gobierno, ofrece bachillerato de arte y cultura y no presenta formación en ciudadanía en su malla curricular como podemos observar a continuación, salvo materias relacionadas con las Ciencias Sociales tales como ética y valores, historia de México y Estructura Socioeconómica de México (Figura 3).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

CULTURA | INBAL

Subdirección General de Educación e Investigación Artísticas

Malla curricular del Bachillerato de Arte y Humanidades

Marco curricular común

CAMPO DISCIPLINAR	PRIMER SEMESTRE	SEGUNDO SEMESTRE	TERCER SEMESTRE	CUARTO SEMESTRE	QUINTO SEMESTRE	SEXTO SEMESTRE
MATEMÁTICAS	MATEMÁTICAS I	MATEMÁTICAS II	MATEMÁTICAS III	MATEMÁTICAS IV	MATEMÁTICAS V	MATEMÁTICAS VI
CIENCIAS EXPERIMENTALES	QUÍMICA I	QUÍMICA II	BIOLOGÍA I	BIOLOGÍA II	GEOGRAFÍA	ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE
			FÍSICA I	FÍSICA II		
HUMANIDADES	ÉTICA Y VALORES I	ÉTICA Y VALORES II	FILOSOFÍA I	FILOSOFÍA II		
CIENCIAS SOCIALES	INTRODUCCIÓN A LAS CIENCIAS SOCIALES	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	HISTORIA DE MÉXICO I	HISTORIA DE MÉXICO II	ESTRUCTURA SOCIOECONÓMICA DE MÉXICO	HISTORIA UNIVERSAL CONTEMPORÁNEA
COMUNICACIÓN	LENGUA ADICIONAL AL ESPAÑOL I	LENGUA ADICIONAL AL ESPAÑOL II	LENGUA ADICIONAL AL ESPAÑOL III	LENGUA ADICIONAL AL ESPAÑOL IV		
	INFORMÁTICA I	INFORMÁTICA II				
HUMANIDADES			HISTORIA DE LAS ARTES Y LA CULTURA I	HISTORIA DE LAS ARTES Y LA CULTURA II	HISTORIA DE LAS ARTES Y LA CULTURA III	HISTORIA DE LAS ARTES Y LA CULTURA IV
					SEMINARIO DE ARTE MEXICANO I	SEMINARIO DE ARTE MEXICANO II
					ESTÉTICA I	ESTÉTICA II
					PSICOLOGÍA I	PSICOLOGÍA II
COMUNICACIÓN	TALLER DE LECTURA Y REDACCIÓN I	TALLER DE LECTURA Y REDACCIÓN II				**TALLER DE CREACIÓN LITERARIA
	LITERATURA UNIVERSAL I	LITERATURA UNIVERSAL II	LITERATURA HISPANA	LITERATURA LATINOAMERICANA	LITERATURA MEXICANA I	LITERATURA MEXICANA II

Figura 3. Malla curricular INBAL.
Fuente: INBAL. Secretaría de Cultura.

Como podemos ver con los tres ejemplos mencionados, los temas sobre ciudadanía no presentan criterios comunes ni de forma ni de fondo, y para el caso de la UAdeC, los temas dentro de la asignatura de "ciudadanía" son pertinentes y aceptables, lo que lleva a la UAdeC en la delantera con respecto a estas instituciones educativas en el tema de la educación en ciudadanía, sin embargo, los temas que debe atender la universidad para presentar un proyecto de educación cívica serio, formal y con impacto real generacional son los siguientes:

I. Capacitar de manera obligatoria a todas las y los docentes que impartan dicha asignatura, pues un docente no puede enseñar a estudiantes cómo utilizar el derecho de acceso a la información si nunca en su vida ha utilizado este derecho a través de la Plataforma Nacional de Transparencia;

II. Establecer estrategias metodológicas comunes y generales en todas las escuelas para asegurar que las y los alumnos alcancen conocimientos y competencias básicas como saber utilizar la plataforma de la CNDH para interponer denuncias y proteger sus Derechos Humanos, así como la PNT y solicitar información pública de interés personal y colectivo.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

III. Iniciar una estrategia de transversalidad que involucre a la mayoría de las asignaturas en los contenidos de las cuatro unidades de la materia de "ciudadanía" acorde a la misión, visión y valores universitarios que vuelvan sustancial la formación de ciudadanos en la educación universitaria (media y superior).

Conclusión.

La asignatura de CIUDADANÍA sigue su marcha a pesar de la indiferencia de muchos docentes y directores que han vuelto opcional la capacitación y al parecer la gran mayoría implementa la materia a su manera y sin coordinación como parte de un gran proyecto integral, mucho menos transversal que vaya en sintonía con el Nuevo Modelo Educativo de la universidad en el componente de la formación de buenas y buenos ciudadanos. El primer paso sin duda alguna es la correcta capacitación para implementar la asignatura de manera coordinada y una vez que este escenario se dé, se puede dar paso a la estrategia transversal si la formación de ciudadanos es una intención seria y real dentro de los planes de la UAdeC o una asignatura más de relleno dentro de la malla curricular como un simple requisito que al final no aporte a la formación de auténticos ciudadanos que nuestro país requiere con urgencia.

Referencias bibliográficas

Balderas, F. (2018). Un nuevo escenario para hacer ciudadanía. Memorias Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria. ITSM., pp.75-87. Disponible en: www.congresoinvestigacion.com ISSN: 2395-9711.

Botero, C. (2008). Los ejes transversales como instrumento pedagógico para la formación de valores. Revisa iberoamericana de Educación No. 45. Disponible en: https://www.reserchgate.net/publication/28203272_Los_ejes_transversales_como_instrumento_pedagogico_para_la_formacion_de_valores.

Camps, V. (2007). Educar para la ciudadanía. Colección Foro Educativo, No. 3, Fundación ECOEM, 85 pp. Disponible en: file:///C:/Users/blnks/Downloads/Dialnet-ResenaVictoriaCampsEducarParaLaCiudadania-8028766.pdf

CONALEP (2018). Malla Curricular Bachillerato. Plantel Colima. Disponible en: http://www.conalepcolima.com.mx/wp-content/uploads/2017/06/Mapa-curricular-Contabilidad.pdf

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 23 de enero
Artículo aceptado 28 de febrero de 2023
ISSN: 2683-1848

Secretaría de Cultura. INBAL (2020). Malla curricular de Bachillerato de Arte y Humanidades. Disponible en: https://sgeia.inba.gob.mx/archivos/escuelas/cedart/2020/malla_curricular_bah.pdf

Maiztegui, C. Eizaguirre, M. (2008). Ciudadanía y educación: de la teoría a la práctica. Universidad de Deusto. Bilbao. https://www.corteidh.or.cr/tablas/25506.pdf

Universidad Autónoma de Coahuila. Reforma académica universitaria y nuevo modelo educativo (2021). México. Disponible en: http://www2.uadec.mx/pub/pdf/2021-reforma-academica-universitaria.pdf

Bojórquez, M. Armenta, L. (2016). Ciudadanía y Derecho, Plan de Estudios. Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Disponible en: https://dgep.uas.edu.mx/programasnocturna/SEMESTRE6/43.pdf

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Implementación del protocolo “código trauma” en pacientes politraumatizados en un hospital de Saltillo: Estudio Piloto.

Implementation of the "trauma code" protocol in polytraumatized patients in a Saltillo hospital: Pilot study.

Mónica Jazmín Niño Coronado [1*], Dalia Gutiérrez González [2], Ana Cecilia Cepeda Nieto [3], Marco Aurelio Saucedo Hernández [1].

[1] Hospital General Saltillo. Calle Fray Landín S/N, Nuevo Centro Metropolitano de Saltillo, 25020 Saltillo, Coahuila.

[2] Hospital ISSSTE Regional Monterrey. Avenida Adolfo López Mateos 122, Colonia Burócratas Federales, 64380 Monterrey, N.L.

[3] Facultad de Medicina Unidad Saltillo. Universidad Autónoma de Coahuila. Francisco Murguía Sur 205, Colonia Centro, 25000 Saltillo, Coahuila.

*Autor para correspondencia:
monicajninoc@gmail.com

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

RESUMEN

El politrauma ocupa la tercera causa de muerte a nivel mundial. El presente estudio implementó el protocolo de politrauma "código trauma" en el Hospital General de Saltillo y comparó la mortalidad en dos tipos de atención primaria: la mortalidad del paciente politraumatizado valorado y atendido con el protocolo "código trauma", versus la atención estandarizada Institucional. Estudio ambispectivo con un total de 268 pacientes donde se realizaron las escalas de evaluación RTS (Revised Trauma Score), AIS (Abreviated Injury Scale) e ISS (Injury Severity Score). Se valoraron a los pacientes con diagnóstico de politrauma que ingresaron a la unidad de urgencias del hospital de acuerdo con parámetros de severidad de estas escalas, proporcionando atención especializada inmediata, con el fin de disminuir la mortalidad. La implementación del protocolo "código trauma" fue exitosa y permitirá un diagnóstico e intervención oportuna en el paciente con politraumas. Se concluyó que el politrauma es uno de los principales diagnósticos que requieren intervención quirúrgica en el hospital. En el presente estudio piloto, los datos comparativos de mortalidad con los dos tipos de atención primaria no alcanzaron la significancia estadística, sin embargo, el estudio deja pauta para que el Hospital General de Saltillo continúe realizando el protocolo de politrauma y eleve la calidad de atención del paciente.

PALABRAS CLAVE: politrauma, atención primaria, protocolo de trauma, código trauma.

ABSTRACT

Polytrauma is the third leading cause of death worldwide. The present study implemented the "trauma code" polytrauma protocol at Hospital General Saltillo and compared mortality in two types of primary care: mortality of polytraumatized patients assessed and treated with this protocol versus standardized institutional care. Ambispective study with a total of 268 patients where the RTS (Revised Trauma Score), AIS (Abbreviated Injury Scale), and ISS (Injury Severity Score) evaluation scales were used. Patients with a diagnosis of polytrauma who were admitted to the hospital emergency unit were evaluated according to the severity parameters of these scales to provide immediate specialized care to reduce mortality. The

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

implementation of the "trauma code" protocol was successful and will allow timely diagnosis and intervention in the polytrauma patient. It was concluded that polytrauma is one of the main diagnoses requiring surgical intervention in the hospital. With the present pilot study, the comparative mortality data with the two types of primary care did not reach statistical significance however, the study leaves a guideline for the General Hospital of Saltillo to continue implementing the polytrauma protocol and improve the quality of patient care.

KEY WORDS: polytrauma, primary care, trauma protocol, trauma code.

Introducción

Se define como politraumatizado al paciente que sufre un traumatismo múltiple con afectación de distintas regiones anatómicas u orgánicas. Es la tercera a quinta causa de muerte a nivel mundial, con predominio en personas de 5-29 años edad y género masculino (WHO, 2004). De acuerdo con un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2018, las muertes por accidentes de tránsito continúan aumentando, con un promedio anual de 1,35 millones. Se estima que para el año 2030 las lesiones causadas por accidentes de tránsito pasen de ser la octava causa global de discapacidad a ocupar el quinto puesto (Lockey, 2018). De esta forma, cerca del 90% de las muertes relacionadas por traumatismo ocurren en países de bajos y de medianos ingresos. El impacto económico constituye un problema de salud pública a nivel global, por lo que es esencial prevenir tanto defunciones, como la morbilidad y la incapacidad que involucran. Se estima que el costo de este tipo de lesiones abarca entre el 1-1.5% del producto interno bruto (PIB) con un costo anual global cercano a los $518,000 millones de dólares (Magnus y col., 2020).

En particular, en el estado de Coahuila en el año de 2019, se registraron 13,428 accidentes terrestres según la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (Cuevas y col., 2020); se reportaron 302 colisiones en carretera federal, de las cuales hubo 92 fallecimientos en el sitio de accidentes y 209 personas lesionadas, con un gasto en daños materiales de 1,765.03 miles de dólares. Dentro del tramo de carreteras del estado, la carretera de mayor número de

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

colisiones reportada fue la ruta MEX- 057D, siendo la de mayor historia de lesionado y muertos en sitio la MEX-054 (Cuevas y col., 2020).

Enfocados en el paciente politraumatizado, se han creados distintas escalas de triage de trauma. Diversos reportes han evaluado la mejor metodología para predecir la mortalidad por medio de las escalas de trauma TRISS (Trauma Injury Severity Score), RTS (Revised Trauma Score), e ISS (Injury Severity Score) (Singh y col., 2011). Se concluyó que tanto TRISS como RTS cuentan con la misma probabilidad de supervivencia y se documentó la relación entre mayor puntaje de ISS con aumento de la mortalidad. Una ventaja del RTS, es que cuenta con parámetros de evaluación accesibles en todas las unidades de primer contacto por lo que es fácil de calcular, asignando puntajes del 0 a 4. Dichos puntajes son incorporados a una fórmula que asigna un valor mínimo de 0 y un máximo de 7.8408; teniendo el primer puntaje una tasa de supervivencia de 2.7% y el segundo una tasa de 99%. Se toma como corte una puntuación tasa de supervivencia de 2.7% y el segundo una tasa de 99%. Se toma como corte una puntuación mayor o igual a 4 puntos al tratarse de un traumatismo severo, el cual requiere de atención inmediata (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de evaluación del RTS Score.

RTS					
Signos / Puntaje	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Estado de Conciencia (GCS)	3	4-5	6-8	9-12	13-15
Presión Arterial Sistémica	0	1-49	50-75	76-89	>89
Frecuencia Respiratoria	0	1-5	6-9	>29	10-29

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

RTS= 0.9368 (GCS)+0.7326 (PAS) + 0.2908(FR)

Puntuación mínima= 0, corresponde a una tasa de supervivencia = 2.7%

Puntuación máxima = 7.8408, corresponde a una tasa de supervivencia =99%

Aquellos pacientes con menos de 4 puntos deben ser trasladados bajo código rojo.

Fuente: Modificado de Singh y col., 2011.

La escala de valoración de gravedad de lesiones (Injury severity score; ISS) publicada en 1974, se basa en la clasificación anatómica de gravedad de la AIS. Esta escala combina la puntuación de las tres regiones del cuerpo con más gravedad. Estas se elevan al cuadrado y se suman obteniendo una puntuación de ISS, la cual constituye un rango de 0-75. Se considera valor indicativo de politrauma un puntaje de ISS de 16 puntos o más. Este cálculo se considera como predictor de mal pronóstico en politrauma. En la escala AIS, se toma como indicador de severidad un puntaje mayor o igual a 3 por sección afectada, siendo la más grave las correspondientes a puntuación de 6 (**Tabla 2**).

En el Reino Unido, según las Guías NICE (National Institute for Health and Care Excellence), en los últimos 25 años se ha visto mejoría en el pronóstico de los pacientes (NICE, 2020). Esto debido a una educación a la población en general, mejorías en el manejo pre-hospitalario y la aplicación de la escala ISS en el departamento de urgencias y en la administración hospitalaria. Además de esto, la integración de una red de comunicación entre los Centros certificados de Trauma ha mejorado la calidad de la atención de los centros hospitalarios hacia los pacientes (Lunevicius & Mesri, 2021; Mahmood & Kaisy, 2020).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tabla 2. Parámetros de evaluación del AIS Score.

Escala abreviada de lesiones (AIS)	
Puntuación	**Tipo de Lesión**
1	Menor
2	Moderada
3	Grave
4	Severa
5	Crítica
6	Incompatible con la supervivencia
Las lesiones se ordenan en una escala de 1-6, en la que el 1 es una lesión menor y el 6 corresponde a una lesión incompatible con la supervivencia. Esto representa una < amenaza para la vida > asociada a la lesión.	

Fuente: Rapsang & Chowlek, 2015.

Con la información antes mencionada es evidente lo necesario de implementar un protocolo de politrauma en los servicios de urgencias de México, sobre todo en los hospitales con alto índice de atención de politrauma. El Hospital General de Saltillo atiende a un gran número de este tipo de pacientes. En el año 2019 se registraron un total de 376 ingresos con este diagnóstico. De los cuales se reportó una mortalidad del 2.12%; esto en consecuencia a la gravedad de sus lesiones. Es por ello qué se estableció la necesidad de implementar un protocolo especializado “protocolo código trauma” y comparar la mortalidad del paciente politraumatizado valorado con este protocolo versus la atención estandarizada institucional del Hospital General de Saltillo, que carece de protocolos y simplemente la atención primaria consiste en una valoración general del paciente, sin tomar en cuenta el grado de traumatismo ni involucrar en la misma a los médicos especialistas de las áreas quirúrgicas y áreas de cuidados intensivos.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Materiales y Métodos

Se analizó el efecto en la mortalidad de pacientes politraumatizados al aplicar el protocolo de politrauma "código trauma" en urgencias en el Hospital General de Saltillo. Se contó con 2 grupos de muestra:

A) Pacientes con diagnóstico de politrauma atendidos en el año 2019 (parte retrospectiva del estudio; grupo 1)
B) Pacientes con diagnóstico de politrauma que entraron al programa piloto "código trauma" de abril a noviembre del 2022 (parte prospectiva del estudio; grupo 2).

Se obtuvieron datos de las variables antropométricas, mortalidad, tipos de tratamiento, datos demográficos, ingreso a quirófano, Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) u hospitalización en piso, tiempos de atención en las diferentes áreas, tipo de primer respondiente, escalas de valoración, entre otros.

Criterios de inclusión: Pacientes de ambos géneros, mayores de 18 años, diagnóstico de trauma de tórax, trauma cerrado de abdomen y traumatismo craneoencefálico.

Criterios de exclusión: Pacientes embarazadas, sin signos vitales, con lesión vascular, discapacidad mental o pacientes inconscientes o sin familiar.

Criterios de eliminación: Pacientes con muerte encefálica o que no cumplieron los puntajes RTS, AIS, ISS para el código de politrauma.

Este la fase retrospectiva del estudio se realizó la revisión de expedientes clínicos de los pacientes que llegaron a urgencias durante el año 2019 por diagnóstico de politrauma, trauma de tórax, trauma cerrado de abdomen y traumatismo craneoencefálico (TCE); mientras que en la fase prospectiva los pacientes, después de firmar consentimiento informado, fueron valorados con las escalas AIS, RTS e ISS. Se verificó que el paciente contara con el puntaje necesario para categorizarse como trauma severo (Singh, 2011). Al tener el paciente la categoría de trauma severo se activó el "código de trauma" y se llamaba a los especialistas en cirugía, cuidados intensivos, traumatología, radiología, entre otros; los cuales forman

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

parte del equipo de respuesta inmediata al trauma (ERIT). Se valoró el servicio adecuado para esos casos y la necesidad de estudios complementarios. Adicionalmente, se determinó la necesidad de procedimiento quirúrgico y/o cuidado especializado. El diagrama de flujo del protocolo "código de trauma" se muestra en las **Figuras 1 y 2.**

Se realizó el análisis descriptivo de las variables y covariables a través de la determinación de la media, mediana, desviación estándar, frecuencia y porcentajes. Además de la prueba de Chi cuadrada para comparar datos categóricos y la prueba de t-student para la comparación de variables cuantitativas entre grupos. Los datos estadísticos se analizaron con el programa SPSS versión 25.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

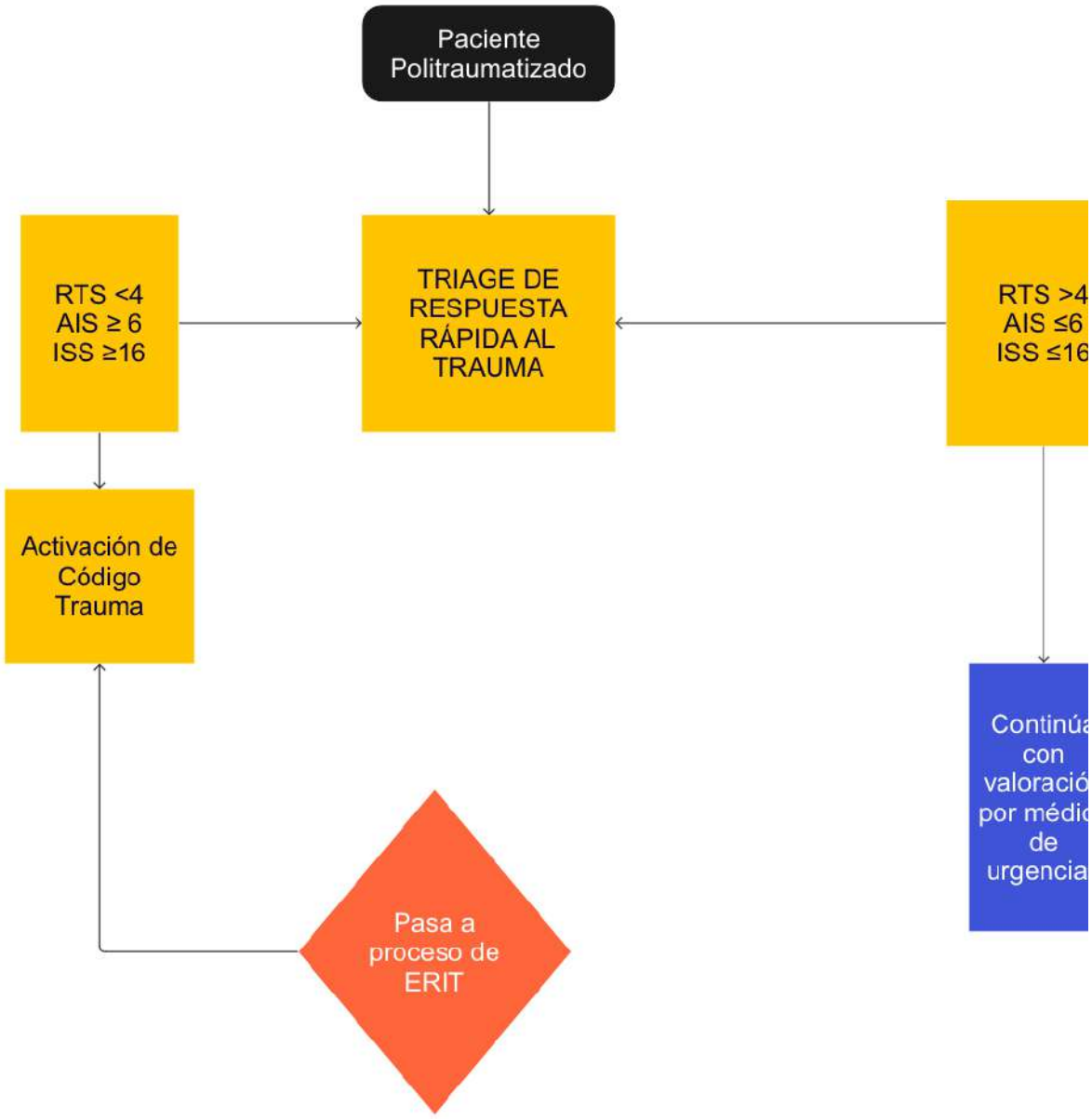


Figura 1. Valoración inicial de paciente politraumatizado.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

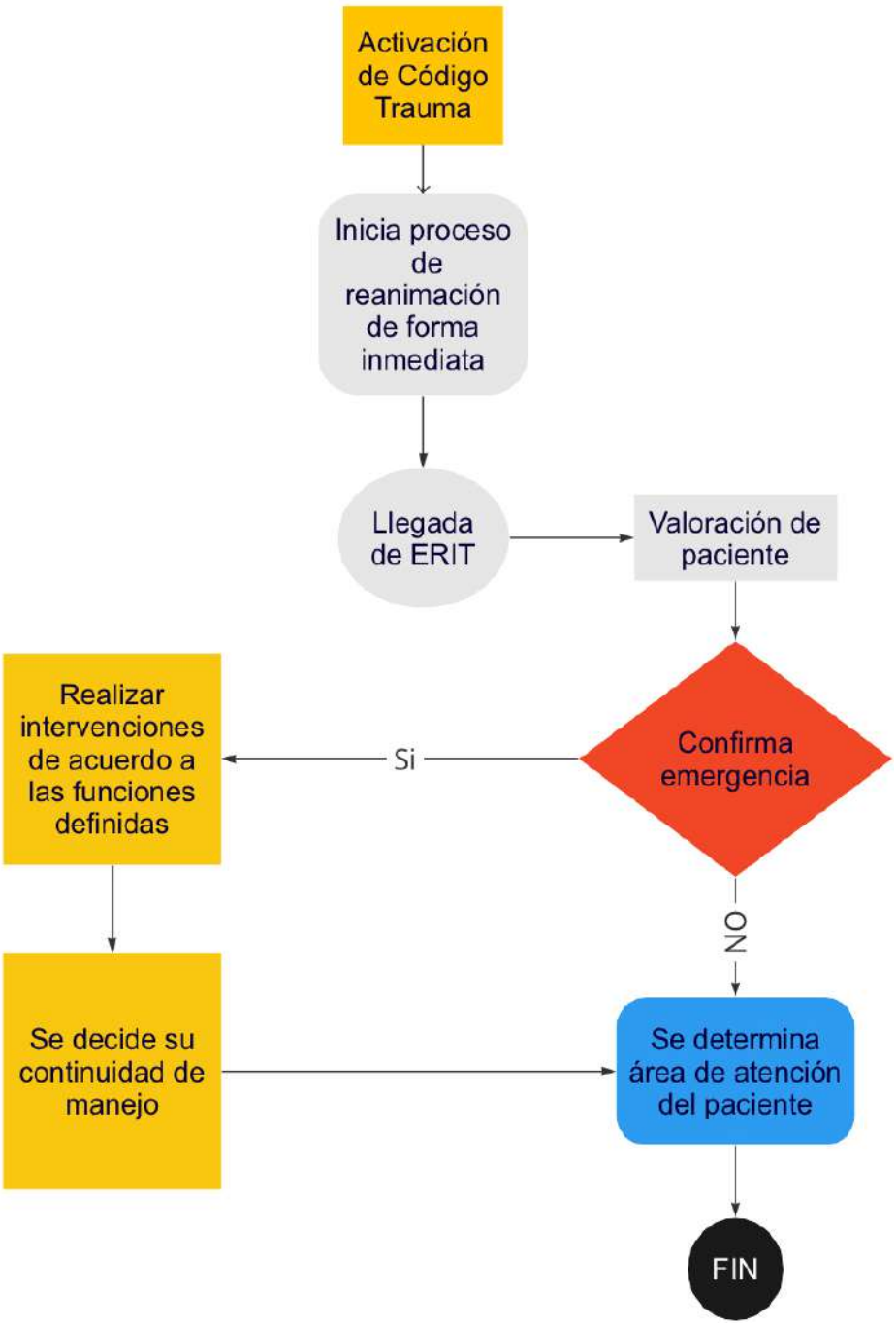


Figura 2. Valoración del paciente bajo el Código de Trauma.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Consideraciones éticas

El estudio se apegó a los lineamientos y las normativas éticas de las Guías de Buenas Prácticas Clínicas (BPC) emitidas por la Consejo Internacional de Armonización (ICH) (ICH, 2016), la declaración de Helsinki (2013) (Asociación Médica Mundial, 2013), todas las leyes y/o normas locales aplicables (Ley General de Salud en México (LGS) (Secretaria de Gobernación, 1984), y el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación en Salud (Secretaria de Servicios Parlamentarios, 2014); así mismo, también respetó el principio de beneficencia (López, 2020).

Tanto para la parte retrospectiva del estudio, como para la parte prospectiva, los pacientes firmaron un consentimiento informado. Dicha documentación fue evaluada y aprobada por el comité de ética del Hospital General de Saltillo.

Resultados

El estudio concluyó con 268 pacientes, de los cuales 226 pacientes fueron del grupo retrospectivo (grupo 1) y 42 pacientes del grupo prospectivo (grupo 2). Se determinó una media de edad de 38 años con desviación estándar de 19 [grupo 1, n=39 (20%) vs grupo 2, n=34 (15%); p=0.037] (**Tabla 3**). La prevalencia mayor de politraumas se presentó en el género masculino. Se registraron frecuencias para tabaquismo de 59 pacientes (22%), etilismo en 87 pacientes (32.5%) y consumo de drogas en 13 pacientes (4.9%). En cuanto a las comorbilidades, se reportaron frecuencias de 149 pacientes (55.6%) con por lo menos 1 comorbilidad. Las comorbilidades más habituales fueron la diabetes mellitus (9%), hipertensión arterial sistémica (13.8%) y la obesidad (6.7%) (**Tabla 3**).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Tabla 3. Datos sociodemográficos de los pacientes en estudio.

	Grupo 1 (n=226) n (%)	Grupo 2 (n=42) n (%)	Valor de P*
Género Masculino	164 (72.6)	35 (83.3)	>0.05
Edad	39.2 (20)	34 (15)	0.037
Antecedentes personales no patológicos:			
Tabaquismo	46 (31.1)	13 (43.3)	>0.05
Etilismo	69 (40.4)	18 (51.4)	>0.05
Consumo de drogas	11 (9.7)	2 (10.5)	>0.05
Comorbilidades	124 (54.9)	25 (59.5)	>0.05
Diabetes mellitus	20 (8.8)	4 (9.5)	>0.05
Hipertensión arterial sistémica	32 (14.2)	5 (11.9)	>0.05
Obesidad	17 (7.5)	0 (0)	>0.05

Los datos se encuentran presentados en frecuencias (porcentajes).

*Los datos fueron analizados con t-Student para muestras independientes y Chi cuadrada.

En la **Tabla 4** se muestran los datos de atención del paciente en estudio. El urgenciólogo fue el médico que en su mayoría atendió a los pacientes (93.7%). Se evaluaron las frecuencias y porcentajes del tipo de trauma. Respecto a la causa de traumatismo, el mayor porcentaje se presentó en accidente de tránsito (29.9%). Se analizaron las frecuencias de ingreso a quirófano (69% en promedio) [grupo 1, n=162 (71.7%) vs grupo 2, n=23(54.8%); p=0.029],

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

hospitalización (95.1%), ingreso a UCI (5.2%) [grupo 1, n=6(2.7%) vs grupo 2, n=8(19%); p <0.001] y defunción (3%). (**Tabla 4**).

Tabla 4. Datos de atención del paciente politraumatizado.

	Grupo 1 (n=226) n (%)	**Grupo 2 (n=42) n (%)**	**Valor de P***
TCE	38 (17)	8 (19)	0.001
Tórax	16 (7.1)	7 (16.7)	0.001
Abdomen	13 (5.8)	8 (19)	0.001
Politrauma	130 (58)	19 (45.2)	0.001
Fractura expuesta	27(12.1)	0 (0)	0.001
Causas de traumas:			
Accidente de tránsito	66 (29.3)	14 (34.1)	0.037
Caída de su propia altura	57 (25.3)	6 (14.6)	0.037
Trauma con objeto contuso	28 (12.4)	5 (12.2)	0.037
Trauma con arma punzocortante	27 (12)	12 (29.3)	0.037
Trauma con arma de fuego	4 (1.8)	1 (2.4)	0.037
Otro:			
Ingreso a quirófano	162 (71.7)	23 (54.8)	0.029
Ingreso a UCI	6 (2.7)	8 (19)	<0.001
Hospitalización	217 (96)	38 (90.5)	>0.05
Defunción	6 (2.7)	2 (4.8)	>0.05

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

RTS	4.2 (2.4)	6.5(1.3)	<0.001
Primer médico de atención:	213 (94.7)	38 (90.5)	>0.05
Urgenciólogo	12 (5.3)	4 (9.5)	>0.05
Médico general	12 (5.3)	4 (9.5)	>0.05

Los datos se encuentran presentados en frecuencias (porcentajes).

*Los datos fueron analizados con t-Student para muestras independientes y Chi cuadrada.

Abreviaciones: RTS (Revised Trauma Score); UCI (Unidad de Cuidados Intensivos).

Se aplicó la escala de RTS en todos los pacientes, encontrando una media de 4.6 y desviación estándar (DE) de 2.4 en general [grupo 1, 4.2 (DE=2.4) vs grupo 2, 6.5 (DE=1.3); p<0.001]. Las escalas de AIS e ISS solo se pudieron hacer con el grupo prospectivo, obteniéndose una media para AIS de 6.12 (DE=3.2) puntos y del ISS de 43 (DE=39) puntos. Las comparaciones entre los grupos no se pudieron realizar.

Por último, se registraron y graficaron las medias de los tiempos de atención (**Figura 3**). En días de estancia hospitalaria se registró una media de 12.7 días (DE=71). En cuanto a las horas de atención, hubo una media para ingreso a quirófano de 2.4(DE=4.6). En ingreso a UCI se reportó de 0.5 h (DE=3). El ingreso a piso de hospitalización en promedio fue de 13.9 h [grupo 1, 15(DE=16) vs grupo 2, 3.7(DE=4.7); p<0.001]. El tiempo en atención tuvo una media de 4.5 h (DE=8.4) [grupo 1, 4.9(DE=9) vs grupo 2, 2.4(DE=2.2); p=0.001]. El tiempo en atención especializada tuvo una media de 1.7 (DE=2.8).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

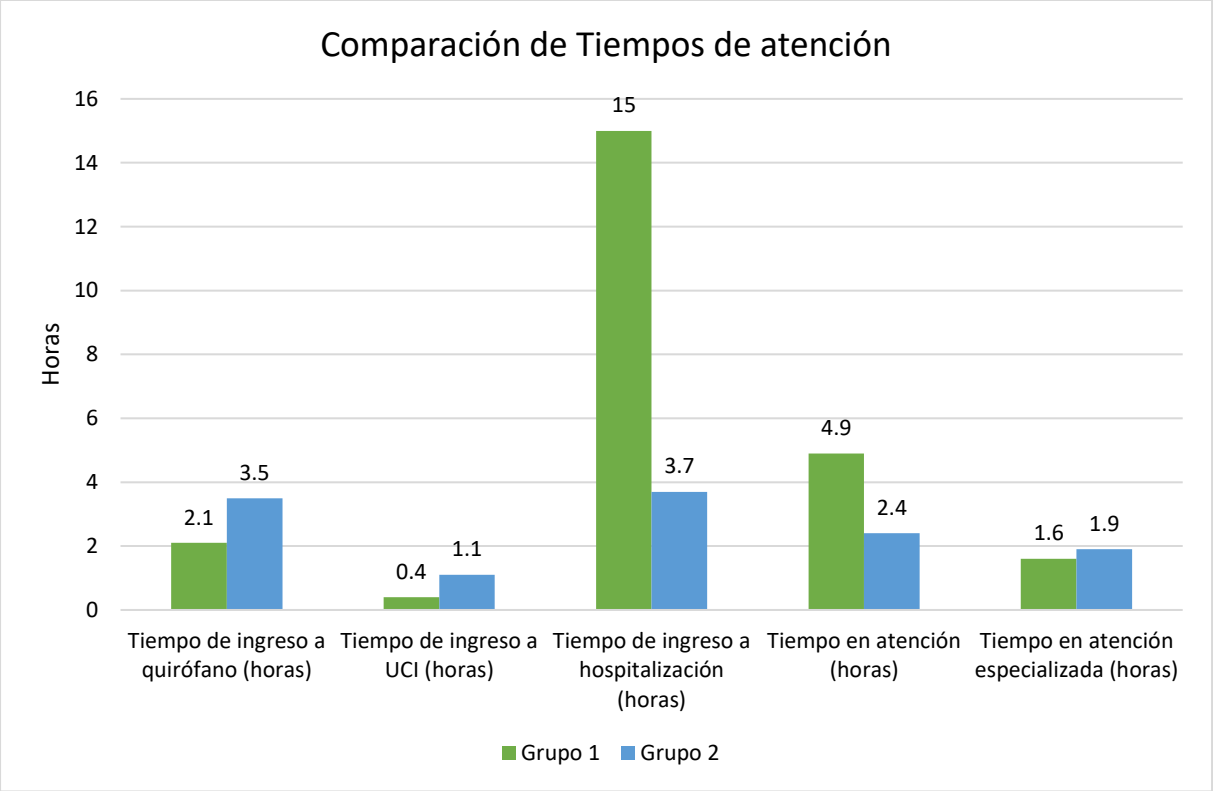


Figura 3. Comparación de tiempos de atención por grupo.

Se grafican y comparan las medias de los datos en ambos grupos de estudio.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

Discusión

El presente estudio constituye el primero documentado sobre los protocolos de politrauma en una Institución de Salud de Sector Público en el Estado de Coahuila. De los resultados obtenidos, se obtuvo información estadística importante que permite comprender la demografía principal de los pacientes politraumatizados. El politrauma con mayor frecuencia se presentó en el género masculino en edad económicamente activa, lo cual concuerda con las cifras internacionales reportadas por la OMS (WHO, 2004). En los resultados del grupo prospectivo se obtuvo una disminución en rango de edad, con una media de 15 años, lo que concuerda con las estadísticas de accidentes de tránsito registrados en 2019 en las principales carreteas del estado de Coahuila (Cuevas y col., 2020). La comparación entre los grupos de estudio sobre accidentes de tránsito mostró que el grupo prospectivo tuvo una mayor frecuencia de accidentes (34%) en comparación con el grupo retrospectivo (29%), con un valor significativo de p= 0.037.

Reportes realizados en Nepal y Reino Unido (Lunevicius & Mesri, 2021; Mahmood & Kaisy, 2020), indican que los accidentes automovilísticos son la primera causa de politrauma. El traumatismo cráneo encefálico se considera como una de las lesiones mayormente reportadas, según la secretaría general del foro internacional de transporte en 2020 (OECD, 2020). Lo anterior se asemeja a los resultados obtenidos en el presente estudio (**Tabla 4**).

Se contabilizó un alto porcentaje de la población con antecedentes de consumo de drogas ilegales (4.9%) y legales (etilismo 32.5%, tabaquismo 22%). Si bien no fue el propósito del estudio realizar una correlación con el consumo de sustancias y los accidentes de tránsito, esto puede ser un agravante directo con respecto a el resultado obtenido en el estudio (Magnus y col., 2020).

En cuanto a la necesidad de atención especializada en área de quirófano se registró un porcentaje mayor de requerimiento en el grupo 1 comparado con el grupo 2 [Grupo 1, media de 2.1 (DE= 1.6) v.s Grupo 2, media de 3.5 (DE= 11); p >0.05] (**Figura 3**). Se muestra además un aumento de ingresos a UCI en el grupo 2 [8(19%) p<0.001] (**Tabla 4**). Esto pude

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

deberse a los puntajes de RTS establecidos en el grupo 2. Sin embargo, es un resultado con sesgo debido a la diferencia en el tamaño de muestra entre ambos grupos.

Se observó un resultado significativo con inclinación a la disminución en tiempo de espera al ingreso a piso en el grupo 2 ($p<0.001$) (**Figura 3**); así como un aumento del tiempo de espera de ingreso a UCI y quirófano en este mismo grupo [UCI 1.1(DE=2.8), $p >0.05$ y quirófano 3.5(DE=11), $p>0.05$] (**Figura 3**). No se encontró literatura que documente las tendencias hospitalarias de este tipo de variables al implementarse un protocolo de trauma, con los cuales podamos comparar los resultados del presente estudio. En reportes del Reino Unido, en un seguimiento a 5 años, se visualizó un aumento de procedimientos quirúrgicos y disminución en tiempo de espera para el ingreso al mismo en pacientes con politrauma (Lunevicius & Mesri, 2021).

En cuanto a la mortalidad, se observó que no hubo diferencia significativa en los datos obtenidos al comparar ambos grupos de trabajo [Grupo 1 (2.7%) $p >0.05$ y Grupo 2 (4.8%) $p >0.05$], datos semejantes a los reportados en el principal estudio de trauma realizado en Liverpool (Lunevicius & Mesri, 2021), en el cual la mortalidad tampoco mostró una disminución significativa.

Los resultados obtenidos en el presente estudio piloto reflejan una tendencia a la mejoría en la atención primaria en el servicio de urgencias, debido a la disminución en el tiempo de atención por médico de primer contacto [Grupo 1 4.9(9) p 0.001 v. s Grupo 2 2.4(2.2) p 0.001], además de una reducción del tiempo de ingreso a piso.

Conclusión

El politrauma es uno de los principales diagnósticos que requieren intervención quirúrgica en las instituciones hospitalarias. La gran mayoría de los politraumas en los pacientes son causados por accidentes automovilísticos en personas de género masculino, con antecedentes

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

de toxicomanías. La atención de estos pacientes y el comprender los antecedentes de estos es importante en el sector salud, debido a la alta necesidad de cuidados intensivos y atención quirúrgica.

La muestra poblacional del presente estudio piloto no fue suficiente para observar una diferencia significativa en mortalidad al comprar la implementación del protocolo politrauma "código trauma" con respecto a la la atención estandarizada Institucional; sin embargo, los datos recabados durante la investigación y la exitosa aceptación del protocolo en el hospital, impulsan a continuar implementándolo para que a futuro se observe una notoria mejora en la calidad de atención primaria del paciente politraumatizado, una disminución de la estancia en las unidades de cuidados intensivos y una disminución en la mortalidad. Esto podría, convertir al Hospital General de Saltillo en un centro de primer nivel de atención para el paciente politraumatizado.

Agradecimientos

Al Hospital General de Saltillo por permitir la realización del trabajo.

Referencias bibliográficas

- Agency for Clinical Innovation. (2017). Clinical guidelines. Trauma 'Code Crimson' Pathway. NSW Institute of Trauma and Injury Management. [En línea] Disponible en: https://aci.health.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/382917/Trauma-Code-Crimson-Pathway-Final-20170919.pdf Recuperado el 02 de marzo de 2022.

- Asociación Médica Mundial. (2013). Declaración de Helsinki. Investigación Médica en seres humanos. [En línea] Disponible en: https://www.wma.net/es/que-hacemos/etica-medica/declaracion-de-helsinki/Recuperado el día 19 de enero 2023.
- Billiar, T. R., & Vodovotz, Y. (2017). Time for trauma immunology. *PLoS medicine*. *14*(7): e1002342. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002342
- Butcher, N. & Balogh, Z. (2009). The definition of polytrauma: the need for international consensus. *Injury*. 40: S12-S22 http://10.1016/j.injury.2009.10.032
- Caba, P & Zafra, J. (2012). Estrategias de tratamiento en el politraumatizado. Ed. SOMACOT. España.
- CDC. (2012). Guidelines for Field triage of Injured Patients. Morbidity and Mortality Weekly Report. *Recommendations and Reports*. 61(1):1-20.
- Cuevas, A.; Silva, M.; Cadengo, M.; Villegas, N. & Mendoza, A. (2020). Estadística de Accidentes de Tránsito año 2018. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. [En línea] Disponible en: https://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt79.pdf Recuperado el 15 de enero de 2023.
- Cuevas, A.; Silva, M.; Cadengo, M.; Villegas, N. & Mendoza, A. (2020). Anuario estadístico de accidentes en carreteras Federales 2019. Secretaria de Comunicaciones y Transportes. Disponible en: https://imt.mx/descarga-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNpb25lcy9Eb2N1bWVudG9UZWNuaWNvL2R0ODIucGRm Recuperado el 15 de enero de 2023.
- Ditzel, R.; Anderson, L.; Eisenhart, W.; Rankin, C.; DeFeo, D.; Oak, S. & Siegler, J. (2020). A review of transfusion- and trauma-induced hypocalcemia: Is it time to change the lethal triad to the lethal diamond? *The journal of trauma and acute care surgery*. *88*(3): 434-439. https://doi.org/10.1097/TA.0000000000002570
- Fernández, M. & Vásquez, B. (2020). Association between pre-hospital care time and hospital mortality in victims of traffic accidents. *Rev. Fac. Med. Hum.* 20(1):144-152. https://doi.org/10.25176/RFMH.v20i1.2558

- Granström, A.; Strömmer, L.; Schandl, A & Östlund, A. (2018). A criteria-directed protocol for in-hospital triage of trauma patients. *European Journal of Emergency Medicine*. 25:25-31. http://doi.org/10.1097/MEJ.0000000000000397
- Hefny, A.; Idris, K.; Eid, H. & Abu-Zidan, F. (2013). Factors Affecting Mortality of critical care trauma patients. *African Health Sciences* 13(3): 731-735. http://doi.org/10.4314/ahs. v13i3.30
- Hulme, J & Steyn, R. (2018). Blunt Chest Trauma (Rib Fracture) Management Guideline. Midlands Critical Care & Trauma Networks. [En línea] Disponible en: https://www.wymtn.com/uploads/5/1/8/9/51899421/blunt_chest_trauma___rib_fractures_-_adults.pdf Recuperado el 15 de enero de 2022.
- Hwang, P. F., Porterfield, N., Pannell, D., Davis, T. A., & Elster, E. A. (2011). Trauma is danger. *Journal of translational medicine*. 9: 92. https://doi.org/10.1186/1479-5876-9-92
- ICH (2016). Guía armonizada de ICH. [En línea] Disponible en: https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/12/ICH-E6-REVISION-2.pdf Recuperado el 19 de enero de 2023.
- Illescas, G. (2006). Triage: atención y selección de pacientes. *TRAUMA*, 9(2):48-5.
- Khudaddad, U; Wafa, A, Ali, A, Khan, U; Razzak, J & Siddiqi, S. (2020). Perception of the current trauma and emergency care system in Kabul, Afghanistan: a mixed method study. BMC Health Serv Res 20: 991. https://doi.org/10.1186/s12913-020-05845-8
- Lockey, D. (2018). Improved Trauma Outcomes after the Introduction of a trauma System in England. EClinicalMedicine 2-3: 3-4. http://doi.org/10.1016/j.eclinm.2018.08.002
- Lopez, L. (2020). El principio de benefícienlo como articulador entre la teología moral de la persona. [En línea] Disponible en: http://www.scielo.org.co/pdf/frcn/v62n174/0120-1468-frcn-62-174-7.pdf Recuperado el 19 de enero de 2023.

- Lord, J. M., Midwinter, M. J., Chen, Y. F., Belli, A., Brohi, K., Kovacs, E. J., Koenderman, L., Kubes, P., & Lilford, R. J. (2014). The systemic immune response to trauma: an overview of pathophysiology and treatment. *Lancet.* 384(9952): 1455–1465. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60687-5
- Lunevicius, R & Mesri, M. (2021). A profile of a major trauma center of Northwest England between 2011 and 2018. *Nature*. 11:5393. http://doi.org/10.1038/s41598-021-84266-x
- Magnus, D. et al. (2020). Establishing injury surveillance in emergency departments in Nepal: protocol for mixed methods prospective study. *BMC Health Services Research.* 20:433. http://doi.org/10.1186/s12913-020-05280-9
- Mahmood, M & Al- Kaisy, M. (2020). A look on trauma code activation in a major trauma center in UAE: a descriptive study Document Type: Original Article. *Journal of Emergency Practice and Trauma*. 6(2): 82-86. http://doi.org/10.34172/kept.2020.16
- Mitra, B. Et al. (2017). Protocol for a prospective observational study to improve prehospital notification of injured patients presenting to trauma centers in India. *BMJ Open* 7: e014073. http://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-014073
- Moratalla, G.; Gómez, R.; Hinojosa, L & Ocaña, L. (2019). Protocolo del Código Trauma en hospital de nivel III. *Cir. Andal*. 30(1):107-12.
- National Institute for Health Care Excellence. (2022). Major Trauma: assessment and initial management. NICE Guideline NG39. National Clinical Guideline Centre. [En línea] Disponible en: https://www.nice.org.uk/guidance/ng39/resources/major-trauma-assessment-and-initial-management-pdf-1837400761285. Recuperado el 19 de enero 2023.
- International Transport Forum. (2022). Road Safety Annual Report 2022. OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/badaa1a4-en.

- Okereke, I.; Zahoor, U. & Ramadan, O. (2022). Trauma Care in Nigeria: Time for an Integrated Trauma System. *Cureus* 14(1): e20880. http://doi.org/10.7759/cureus.20880
- Payal, P; Sonu, G; Anil, G & Prachi, V. (2013). Management of polytrauma patients in emergency department: An experience of a tertiary care health institution of northern India. *World J Emerg Med*. 4(1):15-19. http://doi.org/10.5847/wjem.j.issn.1920-8642.2013.01.003
- Rapsang, A & Chowlek, D. (2015). Compendio de las escalas de valuación de riesgo en el paciente politraumatizado. *Cir Esp.* 93(4):213-221. http://doi.org/10.1016/j.ciresp.2013.12.021
- Secretaria de Gobernación. (1984). Ley General de salud. [En línea] Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4652777&fecha=07/02/1984#gsc.tab=0 Recuperado el 19 de enero 2023.
- Secretaria de servicios parlamentarios. (2014). Reglamento de la ley general de salud en materia de investigación para la salud. [En línea] Disponible en: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGS_MIS.pdf Recuperado el 19 de enero 2023.
- Sigüenza, D & Vicuña, A. (2015). Tesis "Evaluación del Protocolo de Atención Prehospitalaria para emergencias médicas en politraumatismos atendidos por el Cuerpo de Bomberos y Sistema ECU 911, Azogues 2015". Universidad de cuenca Ecuador. [En línea] Disponible en: https://docplayer.es/96455940-Universidad-de-cuenca-facultad-de-ciencias-medicas-escuela-de-enfermeria.html Recuperado el 19 de enero 2023.
- Singh, J; Gupta, G; Garg, R & Gupta, A. (2011). Evaluation of Trauma and prediction of outcome using TRISS method. *Journal of Emergencies, Trauma, and Shock*. 4(4): 446-449. http://doi.org/10.4103/0974-2700.86626
- Stanford Health Care. (2016). Trauma Guidelines. Stanford Health Care. Lucile Packard Childrens Hospital, Stanford. [En línea] Disponible en:

CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 9 de febrero de 2023
Artículo aceptado 9 de marzo de 2023
ISSN: 2683-1848

https://med.stanford.edu/content/dam/sm/scalpel/documents/MiscDocs/Stanford_Trauma_Guidelines%20June%202016%20draft%20adult%20and%20peds%20FINAL.pdf Recuperado el 09 de marzo de 2021.

- Washington State Department of Health Office of Community Health Systems. Emergency Medical Services & Trauma Section (2016). Trauma Clinical Guideline. [En línea] Disponible en: https://doh.wa.gov/sites/default/files/legacy/Documents/Pubs//689164.pdf Recuperado el 09 de marzo de 2021.
- World Health Organization, International Society of Surgery & International Association for the Surgery of Trauma and Surgical Intensive Care. (2004). Guidelines for essential trauma care / World Health Organization, International Society of Surgery/Société Internationale de Chirurgie and the International Association for the Surgery of Trauma and Surgical Intensive Care (IATSIC). World Health Organization. [En línea] Disponible en: https://apps.who.int/iris/handle/10665/42565 Recuperado el 15 de marzo de 2021.
- World Health Organization. (2017). Save lives: a road safety technical package. World Health Organization. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO [En línea] Disponible en: https://apps.who.int/iris/handle/10665/255199. Recuperado el 01 de marzo de 2021.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Mejora en la eficiencia de absorción de un sistema de películas delgadas de CdS-CdTe mediante el uso de nano rejillas de ITO para aplicaciones fotovoltaicas.

Improvement in the absorption efficiency of a CdS-CdTe thin film system by using ITO nano-grids for photovoltaic applications.

María Isidra Rodríguez González[1], José Manuel González Vargas[1], José Javier Sánchez Mondragón[2], Néstor Lozano Crisóstomo[1], Julio César García Melgarejo[1].

[1] Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Carr. Torreón-Matamoros Km 7.5, Cd Universitaria, C.P. 27410, Torreón, Coahuila, México.

[2] Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Carr. Luis Enrique Erro #1, Tonanzintla, C.P.72840, San Andrés Cholula, Puebla, México.

Autor de correspondencia: Maria Isidra Rodríguez González

Universidad Autónoma de Coahuila

Correo electrónico: rodriguez_isidra@uadec.edu.mx

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Resumen

El teluluro de cadmio (CdTe) es un semiconductor ampliamente utilizado en la fabricación de células solares de película delgada. Sin embargo, las células solares de capas planas presentan el inconveniente de altas pérdidas por reflexión de la luz solar incidente. Para abordar este problema, se ha implementado el uso de nanoestructuras dieléctricas que utilizan la dispersión frontal descrita por la teoría de Mie, con el objetivo de mejorar la absorción de la luz en las células solares de CdTe. En este artículo se describe numéricamente la mejora en la absorción de un sistema de cuatro capas delgadas, el cual está conformado por óxido de indio y estaño (ITO, por sus siglas en inglés Indium Tin Oxide), sulfuro de cadmio (CdS), telururo de cadmio (CdTe) y oro (Au). La propuesta consiste en la incorporación de dos tipos de nano rejillas de ITO, una rejilla simple y una rejilla doble. Los parámetros considerados en nuestro análisis fueron el periodo de las nano rejillas y la separación entre los nano alambres de la rejilla doble. Las soluciones numéricas fueron implementadas en el software COMSOL Multiphysics. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de las nano rejillas contribuye a mejorar la absorción de la capa de CdTe hasta un 3.75%, lo cual ofrece una opción interesante a considerar en el desarrollo de celdas solares mejoradas basadas en CdS-CdTe.

Palabras clave: Celdas solares, CdS-CdTe, nano rejillas, eficiencia cuántica, densidad de potencia absorbida.

Abstract

Cadmium telluride (CdTe) is a widely used semiconductor in the fabrication of thin-film cells. However, flat-layer solar cells have the drawback of high losses due to the reflection of incident sunlight. To address this problem, the use of dielectric nanostructures using forward scattering described by Mie theory has been implemented, with the aim of improving light absorption in CdTe solar cells. In this article we describe numerically the absorption improvement of a four-layer thin-film system, which is composed of Indium Tin Oxide

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

(ITO), cadmium sulfide (CdS), cadmium telluride (CdTe), and gold (Au). The proposal involves the incorporation of two types of ITO nano-grids, a single and a double grid. The parameters considered in our analysis were the period of the nano-grids and the separation between the nanowires of the double grid. We implemented the numerical solutions by using COMSOL Multiphysics software. The results obtained indicate that the incorporation of the nano-grids contributes to improving the absorption of the CdTe layer up to 3.75%, which offers an interesting option to consider in the development of improved CdS-CdTe based solar cells.

Key words: solar cell, CdS-CdTe, nano-grids, quantum efficiency, absorbed power density.

Introducción

La energía solar fotovoltaica es la energía eléctrica obtenida mediante la conversión de la energía de la radiación solar. La investigación en este tipo de energía ha tenido un auge notable en los últimos años debido a que la energía solar fotovoltaica puede conducirnos hacia la sostenibilidad energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (International Energy Agency (IEA), 2022; Kabir y col., 2018)

La conversión de energía solar a energía eléctrica se lleva a cabo en celdas solares, y es posible gracias al fenómeno físico denominado efecto fotoeléctrico (Einstein, 1905). Las celdas solares poseen una estructura interna bastante compleja constituida de capas de diversos materiales. Se pueden identificar cuatro capas que desempeñan las siguientes funciones importantes en una celda solar (Lee & Ebong, 2017; Powalla y col., 2018):

a) La *capa activa*, la cual está hecha de algún material semiconductor, desempeña una parte fundamental en la celda solar, ya que en ésta se lleva a cabo la conversión de radiación solar en energía eléctrica.
b) Los *contactos eléctricos*, tanto en la parte frontal como en la posterior, actúan como terminales que permiten el flujo de electricidad generada por la celda.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

c) En algunos tipos de celdas, se introduce una *capa de amortiguamiento*, misma que se encuentra entre la capa activa y la capa de contacto, cuya función principal es la de mejorar las propiedades electrónicas y la eficiencia de la celda solar.

Dependiendo del tipo de tecnología empleada, el grosor típico de la capa activa de una celda convencional es de 200 a 300 micras (Efaz1 y col., 2021).

En la actualidad, la industria de la energía solar fotovoltaica se encuentra en su mayoría compuesta por células solares de silicio basadas en obleas (c-Si), las cuales pueden lograr una eficiencia de hasta el 26% (Green y col., 2023; Wang & Su, 2014). No obstante, el costo elevado de los módulos fotovoltaicos disponibles en el mercado es un obstáculo importante para la adopción masiva de la tecnología fotovoltaica. Uno de los retos actuales que tiene la investigación en paneles solares es la reducción del material necesario para su fabricación, lo que podría traducirse en un menor impacto ambiental, una reducción de costos de fabricación y un menor costo por watt de energía producida. Por estas razones, se ha incrementado la investigación en celdas solares de película delgada, en donde el grosor de la capa activa es considerablemente más fino de 2 a 5 micras en comparación con las celdas solares típicas de 200 micras (International Energy Agency (IEA), 2022). Sin embargo, estas celdas solares de película delgada presentan inconvenientes, quizás el más importante es una disminución de la eficiencia respecto a una celda convencional precisamente por la reducción del material activo.

Con la finalidad de subsanar la disminución en la eficiencia de las celdas solares de película delgada, se ha explorado el uso de estructuras, como las esferas, los alambres o los pilares; todas estas, en escala nanométrica. El uso de estas nano estructuras ha demostrado una absorción mejorada de la radiación solar debido a fenómenos físicos como la reducción de la luz reflejada por la celda, efectos de concentración de la luz, efectos de guiado de ondas y también la aparición de resonancias plasmónicas descritas por la teoría de Mie (Duque y col., 2017; Wrigglesworth & Johnston, 2021).

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Las celdas solares basadas en el CdTe como capa activa se han convertido en una de las opciones más atractivas para el estudio de los sistemas solares fotovoltaicos. Las principales características que destacan a este material entre otros utilizados en esta tecnología son sus propiedades ópticas, debido a que presenta un valor de banda prohibida aproximado a 1.5 eV, muy cercano al valor teórico óptimo del espectro solar y un alto coeficiente de absorción, lo cual lo hacen ideal para el uso en las celdas solares de película delgada (Bayod-Rújula, 2019). Una configuración común de capas de película delgada se muestra en la Figura 1.

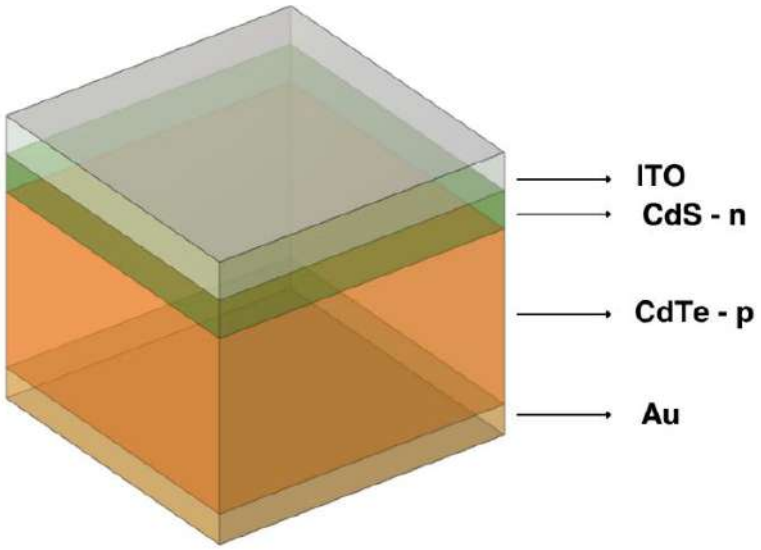


Figura 1. Estructura elemental de capas de una celda solar de película delgada. El contacto frontal está hecho de óxido de indio y estaño (ITO), el cual cuenta con un espesor de 150 nm. La capa de amortiguamiento está hecha de sulfuro de cadmio (CdS) con un espesor de 150 nm, mientras que la capa absorbente es de telururo de cadmio (CdTe) con un espesor de 1000 nm. Finalmente, el contacto posterior está hecho de oro (Au) con un espesor de 100 nm.

Fuente: Elaboración propia.

La investigación actual sobre el mejoramiento de la absorción de la energía solar por medio de nanoestructuras se analiza desde un enfoque óptico. En este artículo se describen

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

las estrategias numéricas que permiten analizar la absorción de radiación en una celda solar de película delgada. En particular, se analizará la propagación del campo eléctrico a través de un sistema simple CdS-CdTe al cual se incorporarán nanoestructuras basadas en nano rejillas dieléctricas las cuales tienen como objetivo incrementar la absorción de la capa activa. El modelado se efectuará en el software de análisis COMSOL Multiphysics.

Modelo simplificado de la celda solar con un nano alambre

En esta sección, se describe numéricamente la propagación de la luz a través de las tres configuraciones indicadas en la Figura 2a-c. Para reducir el tiempo de cómputo requerido para efectuar las soluciones numéricas, el análisis se limitará al caso de geometrías en dos dimensiones. La primera configuración consiste en un sistema de cuatro capas de película

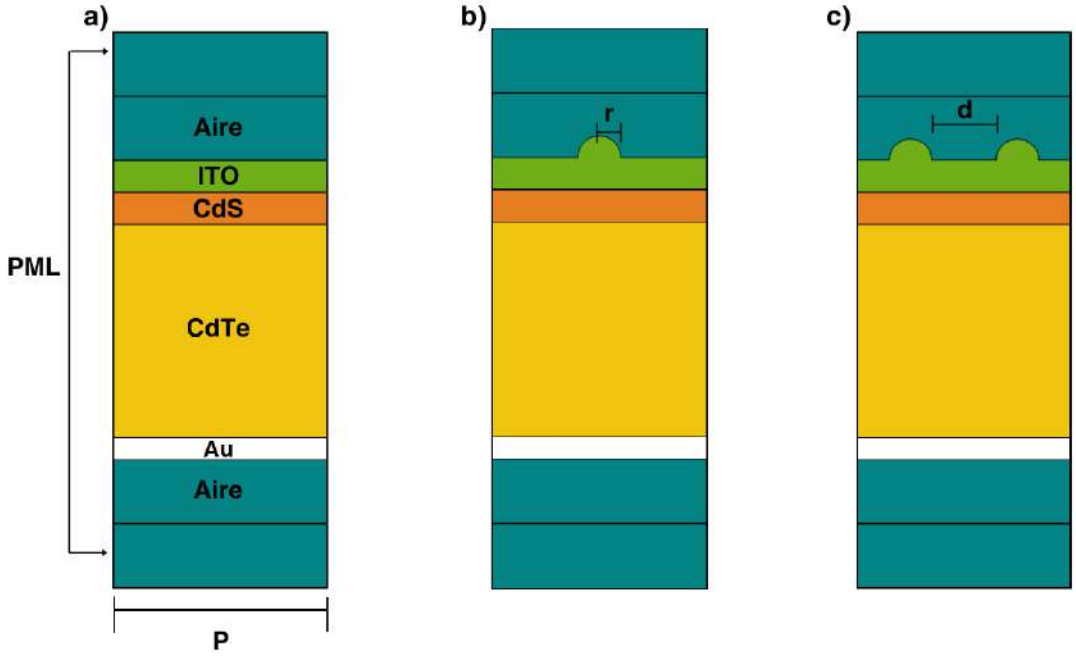


Figura 2. Esquema de los tres sistemas de capas. a) Configuración de sistema de capas en celda plana, b) Configuración con un alambre de ITO y c) Configuración con dos alambres de ITO. Las capas de aire en el sistema al igual que las capas perfectamente combinadas de aire (PML) son dominios numéricos artificiales necesarios para un adecuado modelado numérico.

Fuente: Elaboración propia.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

delgada que representan las componentes elementales de una celda solar. Posteriormente, se analizará el efecto que tiene en la absorción la colocación de un nano alambre de ITO, y finalmente se estudiará el efecto que tiene la colocación de un doble nano alambre. Los alambres de la rejilla y la doble rejilla tienen forma semicircular, y en todos los casos aquí estudiados tienen un radio r de 100 nm.

Los resultados se presentarán para tres valores de periodo P de la configuración (600 nm, 800 nm y 1000 nm). En el caso de la doble nano rejilla, también se analizarán los efectos de variar la distancia de separación d entre los nano alambres. Es importante mencionar que se añadieron un par de dominios artificiales absorbentes PML (Perfectly Matched Layer, por sus siglas en inglés), que tienen la función de evitar soluciones espurias que no correspondan a una situación física. Finalmente, en los bordes izquierdo y derecho se ha aplicado una condición periódica tipo Floquet; al imponer esta condición en los bordes, la geometría indicada puede considerarse la celda básica que constituye nuestra nano rejilla (ver Figura 3a).

Solución numérica.

La simulación inicia con la incidencia sobre el puerto de entrada de una onda plana linealmente polarizada en la dirección z de manera perfectamente perpendicular a la estructura de capas, como se indica en la Figura 3b. Esta onda plana interactuará con los materiales en cada una de las capas obedeciendo la ecuación de onda en el dominio de las frecuencias (Maier, 2007):

$$\nabla\times\left(\nabla\times\mathbf{E}\right)-k_0^2\varepsilon_r\mathbf{E}=\mathbf{0} \tag{1}$$

En la ecuación anterior, el campo eléctrico a través de la estructura es denotado por $\mathbf{E}$, la magnitud del vector de onda en el vacío se denota mediante k_0, mientras que la permitividad relativa es denotada por ε_r. La permitividad relativa es una función compleja de la frecuencia del campo $\varepsilon_r=\varepsilon_1+i\varepsilon_2$, y proporciona todas las propiedades ópticas de los materiales al estar

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

conectada al índice de refracción complejo de la siguiente manera $n^2 = \varepsilon_1 / 2 + |\varepsilon_r| / 2$ y $\kappa = \varepsilon_2 / 2n$. La parte real del índice de refracción n cuantifica la disminución de la velocidad de fase de propagación de las ondas debido a la polarización del material. Por otra parte, la parte imaginaria del índice de refracción κ también se denomina coeficiente de extinción, y determina la absorción óptica de las ondas electromagnéticas al propagarse a través del medio. Este coeficiente de extinción está vinculado con el coeficiente de absorción propio de la ley de Beer (Swinehart, 1962).

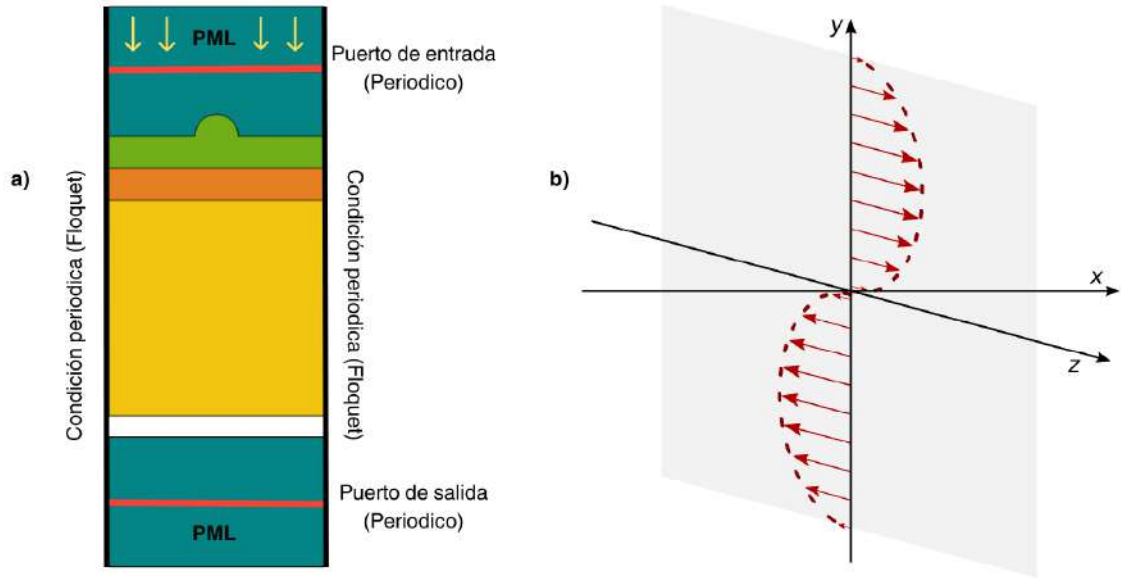


Figura 3. a) Esquema indicando un sistema de capas al cual se le ha añadido un nano alambre. Debido a la periodicidad impuesta por las condiciones de borde tipo Floquet, las soluciones que obtengamos corresponderán a una rejilla. b) Onda plana linealmente polarizada en la dirección z propagándose en la dirección $-y$.

Fuente: Elaboración propia.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

A partir de la solución numérica de la ecuación (1), es posible determinar la densidad de potencia absorbida en cada capa de la estructura por medio de la expresión.

$$Q_e = \frac{1}{2}\omega \,\mathrm{Im}\{\varepsilon\}|\mathbf{E}|^2. \tag{2}$$

Obsérvese que la densidad de potencia absorbida depende de la parte imaginaria de la permitividad del material $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, y también de la frecuencia del campo eléctrico ω. Otra cantidad interesante de analizar es la eficiencia cuántica de un material, esta cantidad se define como la relación entre la potencia absorbida y la potencia incidente.

$$QE(\lambda) = \frac{P_{abs}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)}. \tag{3}$$

La potencia de entrada en la configuración es un parámetro controlado de la simulación, mientras que la potencia absorbida por un material se determina por integración de la densidad de potencia sobre el volumen del material $P_{\text{abs}}(\lambda) = \iiint_V Q_e(\lambda, \mathbf{r})\, dV$.

A pesar de que la densidad de potencia absorbida y la eficiencia cuántica son cantidades importantes, se debe tener en cuenta que el objetivo es simular la radiación solar, la cual está compuesta por un amplio rango de longitudes de onda, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio (K.N. Liou, 2002) . Para proporcionar una versión más realista de la propagación de la luz, se tendrá en cuenta que la onda incidente posee las características del estándar de radiación solar AM1.5G(The German Energy Society, 2013) , dicho estándar es altamente utilizado en el área de energía fotovoltaica. Existen cantidades físicas importantes que consideran las aportaciones de la radiación solar; entre estas destaca la eficiencia cuántica integrada, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$IQE = \frac{\int \frac{\lambda}{hc} QE(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda)\, d\lambda}{\int \frac{\lambda}{hc} I_{AM1.5}(\lambda)\, d\lambda}. \tag{4}$$

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

La eficiencia cuántica integrada tiene una suposición importante: cada fotón absorbido contribuye con la generación de un electrón-hueco y además todos estos contribuyen a la corriente de corto circuito (Bayod-Rújula, 2019). En la práctica ocurren fenómenos más complejos que no pueden ser descritos mediante la solución únicamente de la ecuación de onda, sin embargo, el presente análisis es un buen punto de partida para cuantificar el mejoramiento de la absorción en una situación idealizada.

En el contexto de mejora del rendimiento de la absorción mediante la introducción de nuevas geometrías, es esencial realizar una cuantificación de la mejora lograda. Con este propósito se emplea un indicador clave, el *porcentaje de mejora*, que permite evaluar de manera cuantitativa el impacto de las geometrías propuestas. El cálculo de este porcentaje se lleva a cabo mediante la siguiente expresión:

$$\text{Porcentaje de mejora} = \left(\frac{IQE_{\text{nuevo}} - IQE_{\text{referencia}}}{IQE_{\text{referencia}}} \right) \times 100 \tag{5}$$

En la ecuación (5), IQE_{nuevo} denota la eficiencia cuántica integrada obtenida cuando un alambre o doble alambre es introducido, y $IQE_{\text{referencia}}$ indica la eficiencia cuántica integrada del sistema simple de nano capas, el cual denominamos sistema de referencia.

Resultados y Discusión

Para analizar el comportamiento del campo eléctrico $\mathbf{E}$ a través de las tres estructuras estudiadas (el sistema de referencia, la nano rejilla y la nano rejilla doble), se resolvió la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia. Mediante este enfoque, se logró obtener una descripción detallada de cómo varía el campo eléctrico en función de las características de cada estructura. Además, se consideraron campos eléctricos incidentes en un rango de longitudes de onda desde 300 nm hasta 840 nm. Asimismo, se investigó la influencia de la distancia de separación entre los nano alambres en la nano rejilla doble, para cada uno de los tres valores de periodo P analizados.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

En la Figura 4a-c se presenta la densidad de potencia absorbida de las tres estructuras consideradas para un caso particular, en el que el periodo, la distancia de separación en los alambres de la doble nano rejilla y la longitud de onda del campo incidente son de 1000 nm, 60 nm, y 800 nm, respectivamente. Los resultados están normalizados con respecto al valor máximo de la densidad de potencia del sistema de referencia $Q_e / \max(Q_{e-ref})$. Se observa que, para esta longitud de onda, la mayor parte de la potencia absorbida se concentra precisamente en la capa de CdTe. Además, el sistema de referencia presenta una densidad de potencia absorbida de $2.0478\times10^{12}\,\mathrm{W/m^3}$ y con la introducción de una nano rejilla y de una doble nano rejilla se obtuvieron mejoras del 38.55% y 50.27%, respectivamente.

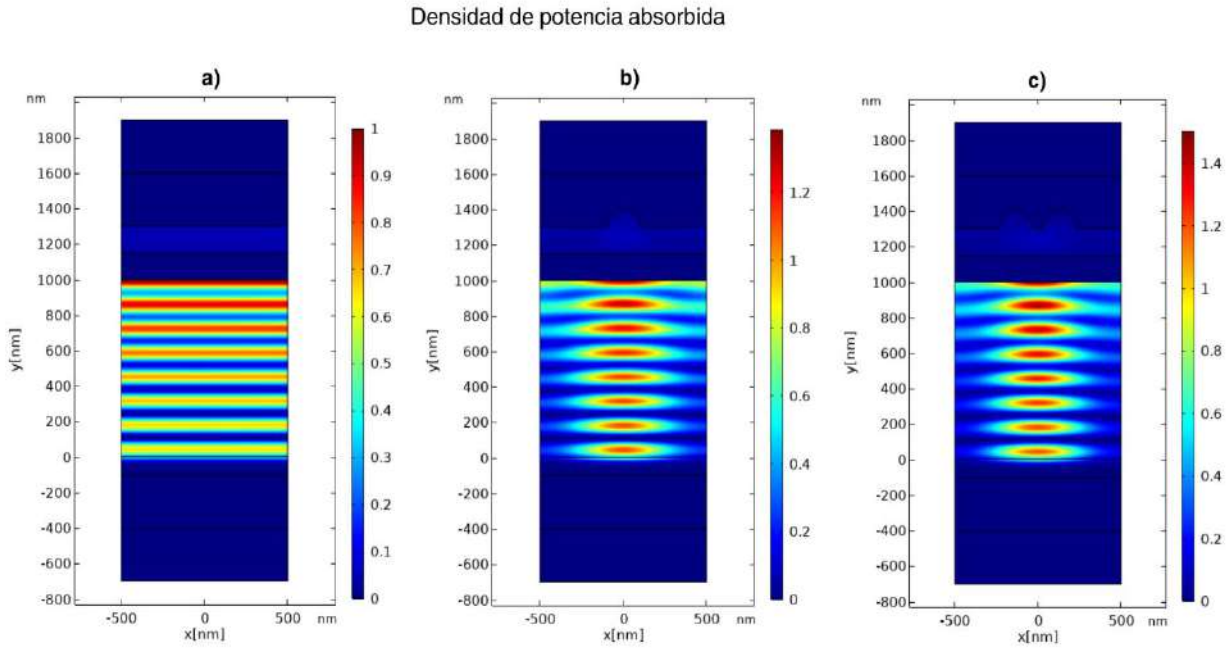


Figura 4. Distribución de densidad de potencia absorbida en la superficie W / m^3 de las estructuras a 800 nm de longitud de onda para a) estructura de placas planas, b) estructura con un nano alambre y c) estructura con doble nano alambre con una distancia de separación $d = 60$ nm.

Fuente: Elaboración propia.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Además de los valores mejorados en la densidad de potencia absorbida, la eficiencia cuántica $QE(\lambda)$ contribuye a un mejor entendimiento de la mejora en la eficiencia de la absorción en todo el rango del espectro que estamos estudiando (desde 300 nm hasta 840 nm). Esta eficiencia cuántica puede interpretarse como el porcentaje que se absorbe de la potencia de radiación incidente y, por lo tanto, se trata de una cantidad adimensional cuyo valor mínimo es cero y el valor máximo es uno.

En la Figura 5 se muestra el cálculo de la eficiencia cuántica para una estructura con periodo de 1000 nm. La eficiencia cuántica de referencia (Gráfica azul) es mayor para longitudes de onda superiores a los 700 nm. Al agregar la rejilla y, aún más drásticamente, al agregar la doble rejilla se observa un incremento en la eficiencia cuántica a longitudes de onda menores que los 700 nm, es decir, más cercanas a la parte azul del espectro. Este hecho puede tener consecuencias interesantes en el incremento de la eficiencia de una celda solar. Es importante tener en cuenta que la energía asociada a un fotón se determina mediante la fórmula $E = hc/\lambda$, donde h, c y λ son la constante de Planck, la velocidad de la luz en el vacío y su longitud de onda, respectivamente (K.N. Liou, 2002). Esto implica que la energía aumenta a medida que la longitud de onda disminuye. Por lo tanto, incrementar la absorción de la radiación en longitudes de onda más cortas puede contribuir a una mejora en las capacidades de una celda solar.

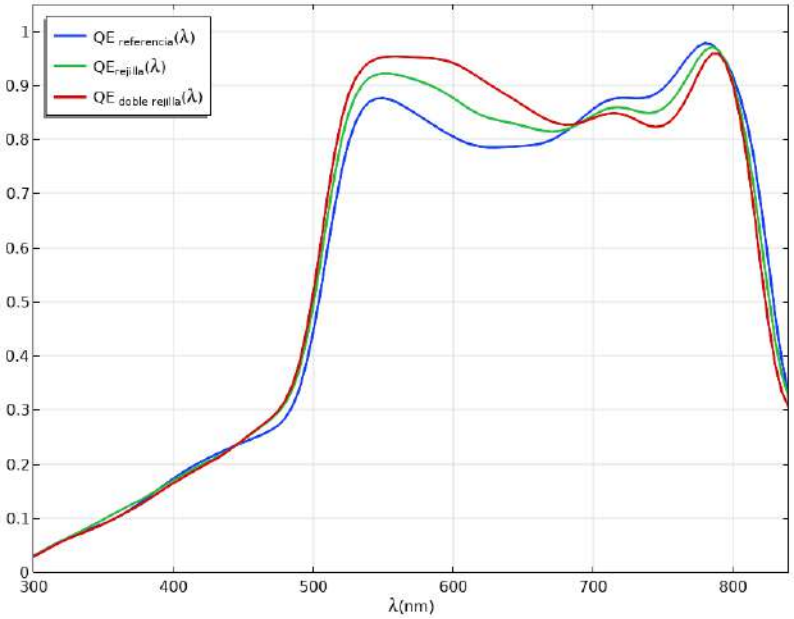


Figura 5. Comparación de la eficiencia cuántica $QE(\lambda)$ del sistema simple de nano capas (El cual

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Para indagar en una posible mejora en la absorción en condiciones de iluminación solar, es requerido considerar las características de dicha radiación, las cuales están contenidas en el estándar AM1.5G. En este trabajo es de especial interés evaluar los efectos de la doble nano rejilla, por lo que se calculó su eficiencia cuántica integrada y a partir de ésta se obtuvo el porcentaje de mejora que se introduce respecto al sistema de referencia. Para un periodo de 600 nm el porcentaje de mejora se incrementó hasta un valor máximo de 2.4%. Se observa que, para el periodo de 800 nm, y también para el de 1000 nm, los porcentajes máximos de mejora son de aproximadamente 3.75%. Las distancias de separación d que permiten estos porcentajes pueden observarse en la Figura 6. Obsérvese que, para un periodo de 1000 nm, el porcentaje de mejora en la absorción decae drásticamente a medida que d se incrementa por encima de los 200 nm.

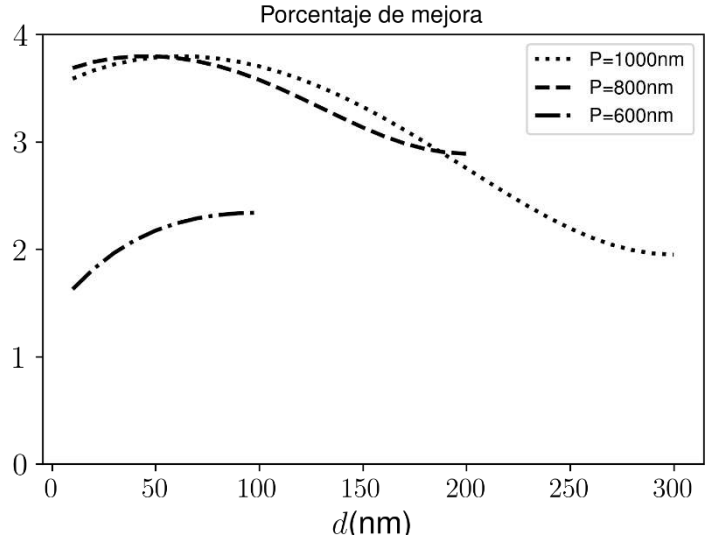


Figura 6. Porcentaje de mejora de la absorción introducida por la doble nano rejilla como función de la distancia de separación entre los nano alambres de ITO. La doble nano rejilla muestra un mejor desempeño cuando el periodo es de 1000 nm y de 800 nm.

Fuente: Elaboración propia.

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Aunque nuestro estudio se centró específicamente en el uso de doble de nano rejilla de ITO, los resultados obtenidos respaldan la idea general de que la modificación de un sistema de capas con nanoestructuras puede conducir a mejoras en la eficiencia y la capacidad de absorción de la radiación solar. Los resultados reportados en la presente contribución son consistentes con estudios anteriores que han utilizado partículas esféricas de ITO sobre nano cables de fosfuro de indio (InP)(van Dam y col., 2016) y también hemisferios de ITO sobre diferentes arreglos de nano cables (Kordrostami & Yadollahi, 2020). Además, existen estudios que reportan el análisis de dímeros metálicos con forma cilíndrica (Belan y col., 2015) semejantes a la nano rejilla doble presentada en este trabajo; sin embargo, es importante destacar, que aún queda mucho por explorar en el campo de las nanoestructuras dieléctricas.

Conclusiones

La fabricación de nano estructuras en sistemas de capas destinados a aplicaciones fotovoltaicas ha demostrado ser un mecanismo efectivo para incrementar la eficiencia de las celdas solares de película delgada. Con la finalidad de incrementar la absorción de un sistema de capas delgadas, se analizó el desempeño de nano estructuras basadas en rejillas simples y dobles hechas de alambres semicirculares de ITO. Las variables geométricas analizadas incluyeron el periodo de las rejillas y la distancia de separación entre los nano alambres de la rejilla doble.

La evaluación del desempeño de la capa absorbente fue efectuada desde un enfoque óptico, es decir, se resolvió numéricamente la ecuación de ondas en el dominio de las frecuencias y se calcularon dos grupos de cantidades físicas. El primer grupo, densidad de potencia absorbida y eficiencia cuántica, considera una radiación incidente uniforme para cada longitud de onda. La introducción de nano rejillas mejoró estas cantidades debido a un incremento en la absorción de radiación de longitudes de onda menores a 700 nm, donde los fotones transportan una mayor energía. El segundo grupo, eficiencia cuántica integrada y

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

porcentaje de mejora, nos proporciona una mejor descripción de la absorción, ya que toma en cuenta el estándar de radiación solar AM 1.5G. La doble rejilla mostró un porcentaje de mejora del 3.75%. Además, se observó que los parámetros geométricos de la doble rejilla deben elegirse cuidadosamente, ya que una mala elección de estos puede incluso provocar un detrimento en la absorción.

Por último, es preciso mencionar que el estudio óptico aquí efectuado puede generalizarse para tomar en cuenta fenómenos más complejos tanto ópticos como aquellos relacionados con las propiedades eléctricas de los materiales semiconductores involucrados. Por ejemplo, nuestro análisis puede extenderse al considerar los efectos de la polarización y el ángulo de incidencia del campo eléctrico. Evidentemente, este análisis más general puede darnos una visión aún más realista del fenómeno de generación de energía fotovoltaica.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Coahuila por su valioso apoyo durante la realización de esta investigación. También se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero otorgado a través de las becas de María Isidra Rodríguez González y José Manuel González Vargas.

Referencias

Bayod-Rújula, A. A. (2019). Solar photovoltaics (PV). En *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies* (pp. 237–295). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4

Belan, S., Parfenyev, V., & Vergeles, S. S. (2015). Negative-angle refraction and reflection of visible light with a planar array of silver dimers. *Optical Materials Express*, *5*(12): 2843. https://doi.org/10.1364/OME.5.002843

Duque, J. S., Blandón, J. S., & Riascos, H. (2017). Localized Plasmon resonance in metal nanoparticles using Mie theory. *Journal of Physics: Conference Series*, *850*: 012017.IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/850/1/012017

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

Efazl, E. T., Rhaman, M. M., Al Imam, S., Bashar, K. L., Kabir, F., Mourtaza, M. E., Sakib, S. N., & Mozahid, F. A. (2021). A review of primary technologies of thin-film solar cells. *Engineering Research Express*, *3*(3): 032001. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac2353

Einstein, A. (1905). On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light. *Annalen der Physik*, 17(6): 132–148.

Green, M. A., Dunlop, E. D., Siefer, G., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, *31*(1): 3–16. https://doi.org/10.1002/pip.3646

International Energy Agency (IEA). (2022). *Renewables 2022*. https://www.iea.org/reports/renewables-2022

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 894–900. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094

K.N. Liou. (2002). Fundamentals of Radiation for Atmospheric Applications. En *An Introduction to Atmospheric Radiation* (Vol. 84, pp. 1–36). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80016-X

Kordrostami, Z., & Yadollahi, A. (2020). High absorption enhancement of invert funnel and conical nanowire solar cells with forward scattering. *Optics Communications*, *459*: 125059. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.125059

Kumar, S. G., & Rao, K. S. R. K. (2014). Physics and chemistry of CdTe/CdS thin film heterojunction photovoltaic devices: Fundamental and critical aspects. En *Energy and Environmental Science* (Vol. 7(1): 45–102. Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/c3ee41981a

Lee, T. D., & Ebong, A. U. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,70: 1286–1297. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.028

Maier, S. (2007). *PLASMONICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. Springer.

Powalla, M., Paetel, S., Ahlswede, E., Wuerz, R., Wessendorf, C. D., & Magorian Friedlmeier, T. (2018). Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu(In,Ga)Se 2 -, and perovskite-based materials. *Applied Physics Reviews*, *5*(4). https://doi.org/10.1063/1.5061809

Swinehart, D. F. (1962). The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education*, *39*(7): 333. https://doi.org/10.1021/ed039p333

Universidad Autónoma de Coahuila
Dirección de Investigación y Posgrado
CienciAcierta No. 75 julio - septiembre de 2023
Recepción de artículo 18 de abril de 2023
Artículo aceptado 9 de mayo de 2023
ISSN: 2683-1848

The German Energy Society. (2013). *Planning and Installing Photovoltaic Systems. A guide for installers, architects and engineers* (2a ed.). Earthscan.

van Dam, D., van Hoof, N. J. J., Cui, Y., van Veldhoven, P. J., Bakkers, E. P. A. M., Gómez Rivas, J., & Haverkort, J. E. M. (2016). High-Efficiency Nanowire Solar Cells with Omnidirectionally Enhanced Absorption Due to Self-Aligned Indium–Tin–Oxide Mie Scatterers. *ACS Nano*, *10*(12): 11414–11419. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b06874

Wang, D., & Su, G. (2014). New strategy to promote conversion efficiency using high-index nanostructures in thin-film solar cells. *Scientific Reports*, *4*(1): 7165. https://doi.org/10.1038/srep07165

Wrigglesworth, E. G., & Johnston, J. H. (2021). Mie theory and the dichroic effect for spherical gold nanoparticles: an experimental approach. *Nanoscale Advances*, *3*(12): 3530–3536. https://doi.org/10.1039/D1NA00148E